Collection
Technique
Cimbéton

G11

Fiches techniques

TOME 2

Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre



CIMbéton
CENTRE D'INFORMATION SUR
LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

FICHES TECHNIQUES

TOME 2

Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre

Avant-propos

Les Fiches techniques, tome II, ont été réalisées par les experts de CIMBÉTON. Elles ont pour titre : « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre ». Elles abordent plus particulièrement :

– les mortiers et coulis ;
– les bétons courants ;
– les bétons à nouvelles performances.

Quant au tome III, il développera l'aspect durabilité et l'esthétique des bétons. Il traitera également des applications du béton dans le domaine du bâtiment, des travaux routiers et du génie civil.

Les Fiches techniques CIMBÉTON, destinées aux acteurs de l'acte de construire ont pour ambition de mieux faire connaître les données essentielles relatives aux ciments et aux bétons dans leur diversité. Elles ont également pour objectif de contribuer à mieux faire connaître les possibilités constructives des bétons en constante évolution. Le béton, matière d'architecture, relève à chaque fois les défis d'exception, de performances structurelles, d'aspect de surface et de dimensionnement.

Sommaire

TOME 2

Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre

I Les mortiers et les coulis 7

1.1 Les chaux hydrauliques naturelles – fabrication et utilisation dans le bâtiment 8
1.1.1 - Rappel historique 8
1.1.2 - Qu'est-ce que la chaux hydraulique naturelle ? 8
1.1.3 - La fabrication des chaux hydrauliques naturelles 9
1.1.4 - La normalisation des chaux hydrauliques naturelles (NHL) norme NF EN 459-1 9
1.1.5 - Les emplois des chaux hydrauliques naturelles 10

1.2 Les mortiers et coulis – généralités 12
1.2.1 - Qu'est-ce que le mortier ? 12
1.2.2 - Les mortiers de chantier et les mortiers prêts à l'emploi 12
1.2.3 - Les emplois des mortiers 14
1.2.4 - Les coulis 15
1.2.5 - Les techniques particulières de mise en œuvre 15

1.3 Les enduits 16
1.3.1 - Rôle de l'enduit 16
1.3.2 - Les types d'enduits 16
1.3.3 - La préparation du support 16
1.3.4 - L'exécution d'un enduit traditionnel 17
1.3.5 - Les enduits monocouches 20
1.3.6 - Traitements de surface décoratifs 21
1.3.7 - Adhérence de l'enduit : les défauts à éviter 21

1.4 Les chapes 22
1.4.1 - Le rôle de la chape 22
1.4.2 - Les différents types de chapes 22
1.4.3 - La réalisation des chapes 23
1.4.4 - Les chapes pour sols industriels 25

1.5 Les scellements et les calages 26
1.5.1 - Les domaines d'emploi 26
1.5.2 - Les exigences 26
1.5.3 - La composition 27
1.5.4 - Les scellements 27
1.5.5 - Le calage 28

1.6 Les mortiers et coulis de réparation 30
1.6.1 - Quand répare-t-on ? 30
1.6.2 - Les causes des dégradations 30
1.6.3 - La reconstitution du béton de surface 31
1.6.4 - Le traitement des fissures 32

2 Les bétons courants 35

2.1 Le béton : connaissance du matériau 36
2.1.1 - Historique 36
2.1.2 - Le béton, pour quoi faire ? 36
2.1.3 - Quels bétons ? 38
2.1.4 - Qu'est-ce que le béton ? 38
2.1.5 - Propriétés des bétons 40

2.2 Domaines d'emploi et fonctions du béton 44
2.2.1 - Les possibilités du béton 44
2.2.2 - Les domaines d'emploi du béton 45
2.2.3 - Le béton et ses fonctions dans le bâtiment 46
2.2.4 - Des bétons adaptés aux besoins 47
2.2.5 - Les deux filières de la réalisation d'un ouvrage en béton 48
2.2.6 - Le béton et la qualité 49

2.3 Formulation des bétons courants 50
2.3.1 - Objet 50
2.3.2 - Rappel des caractéristiques recherchées pour un béton 50
2.3.3 - Comment déterminer la composition du béton ? 50
2.3.4 - L'approche de la formulation 51
2.3.5 - Une méthode pratique de composition : les abaques de G. Dreux 52
2.3.6 - Exemples pratiques de composition 55

2.4 Le béton prêt à l'emploi – BPE 58
2.4.1 - L'origine et le développement du BPE 58
2.4.2 - Les avantages du BPE 58
2.4.3 - Une fabrication industrielle 59
2.4.4 - L'offre BPE 61
2.4.5 - Le transport et la manutention 64
2.4.6 - Les organismes professionnels du BPE 65

2.5 Les bétons : fabrication et transport 66
2.5.1 - La fabrication du béton 66
2.5.2 - L'approvisionnement et le stockage des constituants 66
2.5.3 - Le dosage des constituants 67
2.5.4 - Le malaxage des constituants 68
2.5.5 - Le transport du béton : l'approvisionnement du chantier 69
2.5.6 - Le transport du béton par benne, goulotte, tapis 69
2.5.7 - Le transport du béton par pompage 70
2.5.8 - Les règles à respecter lors du transport 70

2.6 Mise en œuvre du béton sur chantier 71
2.6.1 - Les différentes phases de la mise en œuvre 71
2.6.2 - L'approvisionnement du béton 71
2.6.3 - La mise en place 72
2.6.4 - Le serrage du béton 73
2.6.5 - La mise en œuvre du béton sans vibration : les bétons autoplaçants 74
2.6.6 - Le surfaçage du béton 74
2.6.7 - La protection du béton 74
2.6.8 - Le décoffrage 75
2.6.9 - La cure du béton 76

2.7 Le bétonnage – par temps chaud – par temps froid 78
2.7.1 - Le bétonnage par temps chaud 78
2.7.2 - Le bétonnage par temps froid 81

2.8 Les coffrages de chantier 84
2.8.1 - Le rôle du coffrage 84
2.8.2 - La conception des coffrages 84
2.8.3 - Les différents types de coffrages 85
2.8.4 - La préparation des coffrages 86
2.8.5 - Les produits de démoulage 87

2.9 La vibration du béton sur chantier **88**
2.9.1 - Le rôle de la vibration 88
2.9.2 - Comment agit la vibration ? 88
2.9.3 - Les effets de la vibration 89
2.9.4 - Les paramètres de la vibration 89
2.9.5 - Les matériels de vibration 90
2.9.6 - Les règles de bonne pratique 91

3 - Les bétons aux nouvelles performances 93

3.1 Introduction **94**

3.2 Les Bétons à Hautes Performances – BHP **96**
3.2.1 - Définition des BHP 97
3.2.2 - Formulation, constituants et essais 97
3.2.3 - Spécifications sur les constituants 101
3.2.4 - Avancées récentes 101
3.2.5 - Propriétés physico-chimiqueset mécaniques des BHP 101
3.2.6 - Performances des BHP 104
3.2.7 - Association de bétons et d'armatures à hautes performances 105
3.2.8 - Atouts des BHP 107
3.2.9 - Analyse économique 107
3.2.10 - Principaux domaines d'applications et principales références 107
3.2.11 - Documents de références 109

3.3 Les bétons autoplaçants **110**
3.3.1 - Propriétés des BAP 111
3.3.2 - Principe de formulation des BAP 112
3.3.3 - Fabrication et transport 112
3.3.4 - Mise en œuvre des BAP sur chantier 113
3.3.5 - Domaines d'utilisation privilégiés des BAP 114
3.3.6 - Précautions pour l'emploi des BAP 115
3.3.7 - Les atouts des BAP 115
3.3.8 - Atouts des BAP pour la réalisation des parements 116
3.3.9 - Contrôle des BAP 116
3.3.10 - Documents de référence 118
3.3.11 - Le projet national BAP 118
3.3.12 - Conclusions 119

3.4 Les bétons fibrés **120**
3.4.1 - Généralités 120
3.4.2 - Les différents types de fibres 120
3.4.3 - Les caractéristiques et les propriétés des fibres 120
3.4.4 - Le rôle des fibres 121
3.4.5 - Les atouts des fibres 121
3.4.6 - Les domaines d'application des bétons fibrés 122
3.4.7 - Les fibres polypropylène 122
3.4.8 - Les fibres métalliques 123
3.4.9 - Les fibres de verre 124
3.4.10 - Les techniques de mise en œuvre 124

3.5 Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP **126**
3.5.1 - Historique des BFUP et produits disponibles sur le marché français 126
3.5.2 - Principe de formulation des BFUP 127
3.5.3 - Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation 128
3.5.4 - Performances mécaniques 129
3.5.5 - Traitement thermique 129
3.5.6 - Propriétés des BFUP 130
3.5.7 - Fabrication, transport et mise en œuvre des BFUP 131
3.5.8 - Durabilité des BFUP 132
3.5.9 - Domaines d'applications potentiels des BFUP 132
3.5.10 - Valorisation des performances des BFUP 134
3.5.11 - Document de référence 135
3.5.12 - Perspectives de recherches et développement 136
3.5.13 - Conclusions 136

Chapitre 1

Les mortiers et les coulis

1.1 Les chaux hydrauliques naturelles

1.2 Les mortiers et les coulis – généralités

1.3 Les enduits

1.4 Les chapes

1.5 Les scellements et les calages

1.6 Les mortiers et les coulis de réparation

1.1 Les chaux hydrauliques naturelles
– fabrication et utilisation dans le bâtiment

1.1.1 - Rappel historique

Les chaux sont utilisées depuis des millénaires. Les Chinois, les Égyptiens, les Mayas ont construit des édifices durables avec des mortiers à base de chaux à caractère hydraulique, obtenues par cuisson des calcaires locaux. Plus près de nous, les Romains puis nos ancêtres ont utilisé les mêmes procédés pour construire des ouvrages et des bâtiments qui font partie de notre patrimoine.



1.1.2 - Qu'est-ce que la chaux hydraulique naturelle ?

La chaux hydraulique naturelle est obtenue par calcination, à une température supérieure à 900 °C, de roches calcaires qui contiennent des éléments siliceux et alumineux. Au cours de la calcination, il se forme simultanément :

– de l'oxyde de calcium (chaux vive) provenant de la décomposition du carbonate de calcium, constituant principal du calcaire :

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Carbonate de calcium → oxyde de calcium + gaz carbonique

– des silicates et des aluminates de calcium provenant de la combinaison d'une partie de la chaux vive avec les éléments siliceux et alumineux.

À l'issue de la calcination, les chaux sont hydratées pour éteindre la chaux vive non combinée :

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$$

Cette réaction s'accompagne d'un fort dégagement de chaleur et provoque la pulvérisation du produit. Les chaux éteintes sont généralement broyées. Les silicates et les aluminates de calcium leur donnent la propriété de faire prise et même de durcir sous l'eau. C'est à cette propriété qu'elles doivent leur désignation « chaux hydrauliques naturelles ». Comme les chaux aériennes (calciques ou dolomitiques) les chaux hydrauliques naturelles durcissent également à l'air par carbonatation lente.

Selon la roche ou le constituant d'origine et le traitement subi, on obtient les différentes chaux figurant dans le tableau ci-dessous.

Les différents types de chaux

Matière	***Calcination au-dessus de 900 °C***	***Extinction par hydratation***	***Après tamisage et broyage, produits commercialisés***
Calcaire siliceux et alumineux	CHAUX VIVE + silicates et aluminates	CHAUX ÉTEINTE + silicates et aluminates	CHAUX HYDRAULIQUE NATURELLE (NHL)*
Calcaire à faible teneur en silice et alumine	CHAUX VIVE	CHAUX ÉTEINTE	CHAUX CALCIQUE (CL)*
Calcaire dolomitique à faible teneur en silice et alumine			CHAUX DOLOMITIQUE (DL)*

** Désignations issues de la normalisation européenne (NF EN 459-1) – NHL : Natural Hydraulic Lime – CL : Calcium Lime – DL : Dolomitic Lime*

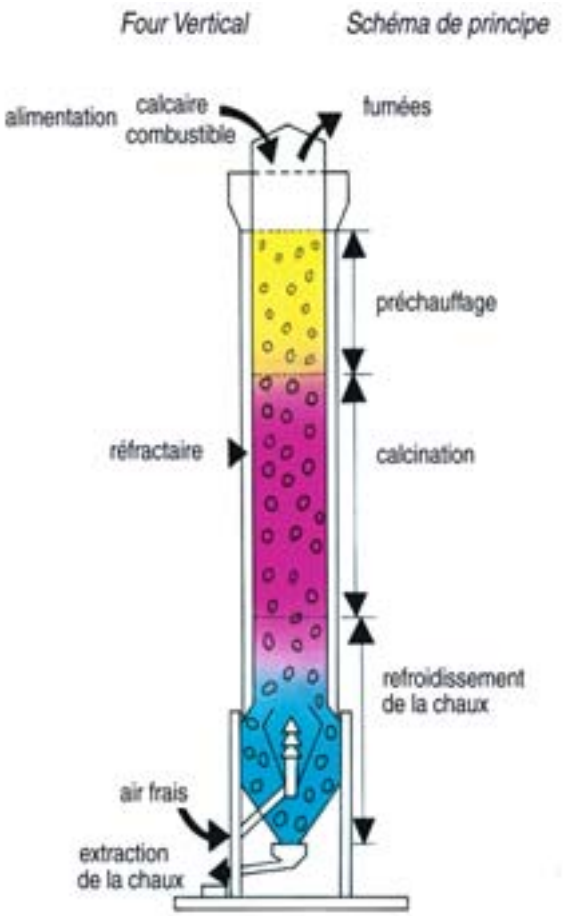
1.1.3 - La fabrication des chaux hydrauliques naturelles

La matière première

La roche calcaire est extraite de carrières à ciel ouvert ou souterraines. Après abattage, elle est concassée et criblée.

La cuisson

La cuisson s'effectue en général dans des fours verticaux à marche continue, dans lesquels sont introduits dans la partie supérieure, par couches successives, la pierre calcaire et le combustible. La matière descend lentement, en traversant d'abord une zone de préchauffage, provoquant l'évaporation de l'eau libre et la déshydratation (vers 200 °C). Elle traverse ensuite une zone de calcination où elle est décarbonatée (à partir de 900 °C). La zone de cuisson proprement dite, où se forment les silicates et aluminates de calcium, se situe à une température variant entre 1 000 °C et 1 200 °C selon la qualité de chaux recherchée.



L'extinction

La chaux recueillie à la sortie du four passe alors par une extinction contrôlée où, sous l'action de l'eau, la pierre se pulvérise et la chaux vive est éteinte complètement, tout en respectant les silicates et aluminates qui lui donnent naturellement son caractère hydraulique.

Le broyage

Le matériau obtenu est généralement broyé, avec ou sans addition d'autres constituants.

1.1.4 - La normalisation des chaux hydrauliques naturelles (NHL) norme NF EN 459-1

Classes de résistance

Les chaux hydrauliques naturelles (NHL) sont classées en fonction de leur résistance à 28 jours exprimée en N/mm² ou MPa (1 N/mm² = 1 MPa). Il existe trois classes de résistance désignées par la valeur minimale : 2, 3,5 et 5. À chaque classe correspond une plage de variation entre cette valeur minimale et une valeur maximale, comme indiqué au tableau ci-dessous.

Exigences sur la résistance mécanique normalisée			
Type de chaux	Classe de résistance	Résistance à la compression en MPa	
		7 jours	28 jours
NHL 2	2	–	≥ 2 à ≤ 7
NHL 3,5	3,5	–	≥ 3,5 à ≤ 10
NHL 5	5	≥ 2	≥ 5 à ≤ 15*

** Si NHL 5 a une masse volumique apparente inférieure à 0,90 kg/dm³, il est permis d'avoir une résistance jusqu'à 20 MPa.*

Caractéristiques physiques et chimiques

La norme fixe des valeurs inférieures ou supérieures pour un certain nombre de caractéristiques.

- La finesse de mouture : refus aux tamis
 - de 90 µm (0,09 mm) ≤ 15 %
 - de 200 µm (0,2 mm) ≤ 5 %.

À titre indicatif ces valeurs correspondent à une surface spécifique Blaine de 8000 cm^2/g à 10000 cm^2/g.
• Stabilité : l'expansion ≤ 2 mm.
• Pourcentage d'eau libre ≤ 2 %.
• Pourcentage de chaux libre ≥ 8 %.

Valeurs caractéristiques des exigences chimiques		
Type	***CO_2***	***Chaux libre***
HL 2	pas d'exigence	≥ 8
HL 3,5		≥ 6
HL 5		≥ 3

Pour mémoire, la limite de teneur en SO_3 est maintenue à moins de 3 %.

• Le temps de prise initial doit être supérieur à une heure. Le temps de prise final doit être inférieur ou égal à quinze heures.
• Teneur en air ≤ à 20 %.

Désignation

La désignation comprend les lettres NHL suivies de la classe de résistance (exemple : NHL 3,5). Lorsqu'une addition de matériaux pouzzolaniques ou hydrauliques est effectuée dans la limite de 20 % comme l'autorise la norme, la chaux hydraulique naturelle est désignée NHL-Z.

1.1.5 - Les emplois des chaux hydrauliques naturelles

Les mortiers de chaux hydraulique naturelle trouvent leurs applications essentiellement dans le bâtiment, où leurs qualités sont appréciées pour les enduits, les menus ouvrages en maçonnerie, la pose de carrelages anciens, le jointoiement et la consolidation de murs, les badigeons et d'une façon générale, pour les travaux de restauration.

Les enduits

La chaux hydraulique naturelle est un liant clair qui, mélangé aux sables locaux, assure une parfaite restitution des enduits anciens. Additionnée de pigments elle permet également de fabriquer des mortiers présentant une vaste palette de teintes éclatantes.

Les nombreuses qualités de la chaux hydraulique naturelle, notamment plasticité et adhérence, rendent son emploi très intéressant et très efficace dans la confection des enduits intérieurs et extérieurs où la résistance de l'enduit doit être adaptée à celle des supports tendres.

Enduits pour le bâti neuf

Les recommandations pour la composition des mortiers à base de chaux hydrauliques naturelles sont détaillées dans la norme NF P 15-201 « DTU 26.1. Travaux de bâtiment. Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne. »*.



Enduits sur maçonneries anciennes

La chaux hydraulique naturelle est particulièrement adaptée à la restauration des constructions anciennes et des monuments historiques (églises, tours,

** Compte tenu de sa date de publication, le DTU 26.1 fait référence à la norme NF P 15-310 de 1969 et à ses désignations.*



châteaux). Ces ouvrages ont souvent été construits en utilisant des chaux hydrauliques naturelles.

L'utilisation de la chaux hydraulique naturelle sur les maçonneries anciennes permet de limiter les risques de fissuration et les désordres divers. Il est par contre essentiel de réaliser des études préalables lorsqu'il est envisagé de mettre en œuvre, à l'extérieur, des mortiers de chaux hydraulique sur des supports à base de plâtre.

Les badigeons

Les chaux hydrauliques naturelles conviennent bien pour la confection de laits de chaux ou badigeons, qui peuvent être colorés dans la masse. Ces chaux sont suffisamment fines et riches en hydroxyde de calcium pour rester en suspension aqueuse et donner un lait de chaux utilisable au moyen d'un pinceau ou d'un pulvérisateur.



Mortiers de pose et de jointoiement

Grâce à ses qualités de plasticité et d'adhérence aux supports, la chaux hydraulique naturelle est bien adaptée au hourdage et au jointoiement de blocs, briques et pierres. Elle peut être employée pure ou bâtardée selon la vitesse de durcissement souhaitée.



Coulis de consolidation

Certaines maçonneries anciennes ont été hourdées à la terre. Au fil des ans celle-ci s'est délitée, tassée ou a fui à travers les joints dégradés du parement.

On les consolide en injectant en aveugle un coulis de chaux hydraulique naturelle par assises successives au fur et à mesure de l'avancement du rejointoiement du parement.

1.2 Les mortiers et coulis – généralités

1.2.1 - Qu'est-ce que le mortier ?

Une construction est généralement réalisée par éléments, dont il faut assurer la liaison ou qu'il faut protéger par un revêtement. On doit alors effectuer des scellements ou divers travaux de reprise, de bouchage, etc. Toutes ces opérations se font à l'aide d'un liant toujours mélangé à du sable, de l'eau – et éventuellement un adjuvant – pour obtenir un « mortier », qui se distingue du béton par l'absence de gravillons.

Des compositions multiples de mortiers peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liant (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; leur choix et le dosage sont fonction de l'ouvrage à réaliser et de son environnement.

Les mortiers bâtards sont constitués par des mélanges de ciment et de chaux avec du sable, dans des proportions variables. Les chaux apportent leur plasticité, les ciments apportent la résistance mécanique et un durcissement plus rapide.

Les mortiers peuvent être :
– préparés sur le chantier en dosant et en mélangeant les différents constituants, adjuvants compris ;
– préparés sur le chantier à partir de mortiers industriels secs prédosés (il suffit d'ajouter la quantité d'eau nécessaire) ;
– livrés par une centrale : ce sont des mortiers prêts à l'emploi, dont les derniers nés, les mortiers retardés stabilisés, ont un temps d'emploi supérieur à 24 heures.

Les mortiers industriels se sont beaucoup développés ces dernières années, permettant d'éviter le stockage et le mélange des constituants sur des chantiers parfois exigus et difficiles d'accès : rénovation, travaux souterrains.

Le marché du bricolage a profité du développement des mortiers prémélangés. Aujourd'hui, on peut trouver dans les surfaces de bricolages des mortiers répondant à tous les besoins non seulement par la nature du produit, mais aussi par son conditionnement plus adapté : sacs de 5 à 25 kg.

1.2.2 - Les mortiers de chantier et les mortiers prêts à l'emploi

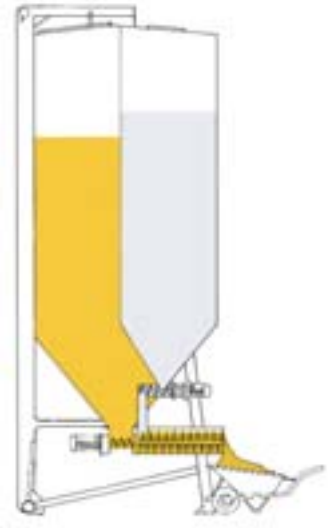
Les mortiers fabriqués sur le chantier

L'entreprise qui fabrique sur le chantier son mortier doit choisir correctement le liant en fonction de son type et de sa classe, le ou les sables, la teneur en eau (pour obtenir la plasticité désirée) et les adjuvants adaptés à la destination du mortier.

Les sables utilisés sont généralement siliceux ou silico-calcaires ; leur granulométrie est de préférence







Mortier de jointoiement produit par silo mélangeur.



continue. Les dosages se feront en poids plutôt qu'en volume comme c'est souvent le cas, afin d'éviter les erreurs de dosage, par suite de l'augmentation de volume du sable humide (foisonnement).

Les mortiers peuvent comporter différents types d'adjuvants :
– réducteurs d'eau-plastifiants ;
– plastifiants ;
– entraîneurs d'air ;
– modificateurs de prise (retardateurs, accélérateurs) ;
– hydrofuges.
Dans tous les cas des soins particuliers doivent être pris afin d'obtenir des mortiers sans ressuage, homogènes d'une gâchée à l'autre.

Le dosage en liant, (ciment ou chaux, ou mélange des deux) le plus généralement employé est de 300 à 400 kg/m³ de sable. Pour un sable courant et un ciment Portland utilisé au dosage de 400 kg/m³ de sable, la quantité d'eau de gâchage nécessaire pour obtenir un bon mortier d'usage courant est de l'ordre de 200 litres au maximum, qu'on a intérêt à diminuer par l'emploi de réducteur d'eau ou de plastifiant.

Les mortiers industriels secs prémélangés

Comme la plupart des produits industriels, ces mortiers font l'objet de contrôles à tous les stades de leur élaboration par le fabricant, ce qui constitue pour l'utilisateur une sécurité.

Les autres avantages présentés par ces produits sont les suivants :
– prédosage de composition constante, garant de régularité et de qualité ;
– pas d'approvisionnement et de stockage sur place des constituants (sables, liants, adjuvants) ;
– perte de temps limitée (appréciable dans le cas de travaux à effectuer rapidement et lorsque la place fait défaut) ;
– chantiers plus propres.

Les producteurs proposent de nombreuses formules standard répondant à la plupart des besoins. Ils peuvent également étudier des compositions de mortier adaptées, donnant les performances optimales requises pour chaque usage. Ces mortiers reçoivent le plus souvent un ou plusieurs adjuvants en poudre, afin de modifier les propriétés rhéologiques, les temps de prise, la durabilité, l'aspect (mortiers colorés) ou leur adhérence grâce à l'ajout de résines vinyliques ou acryliques. Ils sont conditionnés en sacs. Ces dernières années, il est apparu des sacs de 10 et 25 kg pour les petits travaux et le bricolage.

Les mortiers frais retardés, stabilisés, prêts à l'emploi

Depuis quelques années est apparue une nouvelle génération de mortiers livrés par les centrales de béton prêt à l'emploi : les mortiers frais retardés et stabilisés. Du fait qu'ils sont retardés, ces mortiers peuvent être livrés et stockés en quantité importante. On peut les utiliser dans un délai allant jusqu'à 24 heures sans avoir le souci de préparer de nombreuses petites gâchées. Très maniables et homogènes, ils possèdent des résistances très largement suffisantes pour les travaux auxquels ils sont destinés : maçonnerie et jointoiement.

Lorsqu'ils sont étalés en couche mince, la prise de ces mortiers est accélérée (effet d'absorption d'eau par le support et perte par évaporation).

Ces mortiers permettent, comme le béton prêt à l'emploi, de simplifier et d'améliorer les conditions de travail, en évitant les pertes de temps. Ils sont en général livrés dans des auges ou des bacs non absorbants, de 250 à 500 litres de capacité. Ces bacs restent sur le chantier, ce qui fournit un stockage commode et une complète disponibilité.

Les mortiers de fibres

L'incorporation de fibres de verre ou de polypropylène permet d'obtenir des mortiers présentant une cohésion supérieure et moins fissurables. Ce sont soit des mortiers prémélangés, livrés en sac, soit des mortiers prêts à l'emploi, livrés par certaines centrales.

1.2.3 - Les emplois des mortiers

Les joints de maçonnerie

La construction réalisée en éléments maçonnés (blocs de béton, pierres de taille, briques), nécessite leur assemblage avec un mortier qui doit présenter des caractéristiques mécaniques suffisantes pour assurer la transmission des charges et une compacité suffisante pour être étanche. On a généralement intérêt à utiliser des mortiers ne présentant pas un module d'élasticité trop élevé, de façon à pouvoir s'adapter aux variations dimensionnelles des éléments qu'il liaisonne sans fissurer.

Les mortiers de joints constituent donc un maillon important de la maçonnerie, qui doit être bien étudié et bien mis en œuvre pour assurer la fonction qui lui est dévolue. C'est notamment le cas de la maçonnerie apparente. La norme XP P 10-202-1 « DTU 20.1. Ouvrage en maçonnerie de petits éléments. Parois et murs. » fournit des indications sur les dosages préconisés pour les mortiers de jointoiement, ainsi que les préconisations pour leur mise en œuvre.

Les enduits

Ce domaine d'application, qui constitue l'un des plus vastes débouchés des mortiers, fait l'objet du chapitre I.3. Rappelons simplement qu'à côté des enduits traditionnels en trois couches décrits dans la norme NF P 15-201 (DTU 26.1), se développent aujourd'hui les enduits monocouches épais, ainsi que les enduits isolants considérés encore comme non traditionnels. Ces produits font l'objet d'une procédure d'Avis technique par le CSTB.

Les chapes

Les chapes ont pour fonction d'assurer la mise à niveau du dallage et la régularité de sa surface. Les chapes peuvent constituer la finition : on y incorpore alors souvent des produits spécifiques. Elles peuvent aussi constituer le support d'un revêtement de sol. Les chapes doivent présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, et parfois résister à l'abrasion ou au poinçonnement (sols industriels). Adhérente ou flottante, la chape peut également



Réglage d'une chape (le mortier est ici coloré grâce à des pigments minéraux).



Serrage d'un enduit à la spatule.

avoir une fonction thermique ou acoustique. Ces ouvrages sont décrits dans la norme NF P 14-201 « DTU 26.2. Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques. ». Le chapitre I.4 leur est consacré.

Les scellements et les calages

La multiplicité des problèmes de scellement et de calage a conduit les producteurs de mortiers industriels à mettre au point des produits spécifiques adaptés aux travaux à réaliser : scellements d'éléments de couverture, scellements d'éléments de second œuvre, scellements de mobiliers urbains, scellements de regards de visite, assemblage d'éléments préfabriqués… Ces applications sont décrites dans le chapitre I.5.

1.2.4 - Les coulis

Le coulis est un mélange fluide, à base de charges fines inférieures à 0,3 mm, de liants hydrauliques et d'adjuvants. Outre les liants classiques, il existe aussi des liants spéciaux pour coulis d'injection. Les charges sont constituées par des suspensions d'argile, de bentonite (argile colloïdale). Les domaines d'utilisation des coulis sont les remplissages de cavités et fissures dans les roches, les sols ou les ouvrages béton ou maçonneries.

1.2.5 - Les techniques particulières de mise en œuvre

Les techniques traditionnelles sont développées dans les chapitres correspondant aux différents domaines d'emploi (4.2, 4.3 et 4.4). On ne cite donc ici que deux techniques qui intéressent de nombreuses applications : la projection et l'injection.

La projection

Fabriqués sur chantier, ou plus généralement prédosés, les mortiers projetés comportent, outre le liant et le sable habituels, des adjuvants spécifiques



améliorant l'adhérence, des charges (silice, carbonate, etc.), et parfois des fibres (verre, polypropylène ou acier).

Projeté à l'aide de machines le plus souvent à air comprimé, le mortier est plus compact, adhère mieux au support et se prête bien à son application sur des parties d'ouvrages difficiles d'accès et de forme irrégulière. La suppression de manipulations délicates et pénibles, ainsi que les gains de productivité, expliquent le succès du mortier projeté dans de nombreuses applications :
– enduits monocouches, enduits isolants ;
– revêtements de voûtes, en galeries, consolidation de talus ;
– travaux de réparation, etc.

L'injection de mortiers ou coulis

L'injection de mortier n'intéresse que certains types de travaux où les cavités à remplir sont suffisamment larges. Il est nécessaire que le diamètre maximum des grains de sable les plus gros ne dépasse pas le 1/5 des vides les plus fins à remplir. S'il n'en était pas ainsi, il faudrait utiliser des coulis d'injection.

Comme dans le cas des coulis de ciment, le mortier d'injection doit être constitué de façon à être le plus « injectable » possible : grande fluidité pour un ressuage modéré (et, partant, une bonne stabilité, peu de ségrégation).

Les applications de l'injection sont essentiellement le remplissage de cavités, gaines, enveloppes diverses, ou plus généralement les vides d'accès difficile. L'injection est généralement pratiquée pour certains travaux sous l'eau, avec des formules de mortier étudiées pour éviter le délavage.

1.3 Les enduits

Les enduits sont des ouvrages traditionnels qui relèvent de la norme NF P 15-201 (DTU 26.1) « Travaux de bâtiment. Enduits aux mortiers de ciments, de chaux et de mélange plâtre et chaux aérienne ».



1.3.1 - Rôle de l'enduit

Les enduits aux mortiers de liants hydrauliques sont utilisés aussi bien pour les travaux neufs que pour la réfection de façades. Les enduits remplissent plusieurs rôles :
– un rôle de protection du gros œuvre contre les intempéries ;
– un rôle d'imperméabilisation, tout en laissant « respirer » le support ;
– un rôle esthétique (aspect et couleur).
Les enduits habillent le gros œuvre en le protégeant. Ils constituent la finition extérieure visible de la construction.

1.3.2 - Les types d'enduits

Les enduits classiques à base de liants hydrauliques ont une épaisseur de l'ordre de 2 à 3 cm. Ils se distinguent les uns des autres par :
– leur aspect, leur relief, leur teinte ;
– leur composition (liant, sable, adjuvants, colorants, charges diverses, etc.) ;
– leur mode d'application : en trois couches manuelles ou en deux couches par projection mécanique.

Les enduits se sont diversifiés grâce à l'apparition de liants et d'adjuvants mieux adaptés et grâce aux perfectionnements des appareils de projection.

Pour des raisons de rapidité de mise en œuvre, les enduits ont évolué et donné naissance à une nouvelle famille : les enduits monocouche, dont le développement a été favorisé par leur industrialisation.

1.3.3 - La préparation du support

De la bonne préparation du support vont dépendre l'adhérence de l'enduit et son aspect final. Les enduits sont appliqués sur des supports de nature très différente : maçonnerie de pierres, de briques ou de blocs en béton, béton banché brut de décoffrage, béton de granulats légers, béton cellulaire, fibres-ciment, bois. Certains supports permettent une application directe, c'est le cas de la brique, des blocs en béton, des maçonneries de pierre. D'autres supports nécessitent un traitement préalable.

Dans tous les cas, le support :
– doit être débarrassé des poussières et des sels éventuels, être sans trace de plâtre (formation de sulfo-aluminate de chaux expansif avec le ciment) ;
– s'il n'est pas assez rugueux, doit être brossé ou piqué pour permettre un bon accrochage de l'enduit ;
– doit être suffisamment humidifié avant la projection de la première couche d'accrochage (parfois plusieurs humidifications sont à prévoir un jour ou quelques jours à l'avance). Cette humidification en profondeur doit être d'autant plus poussée que l'atmosphère ambiante favorise le séchage (chaleur, vent, etc.).

En revanche, le support doit être « ressuyé » en surface lors de l'application de l'enduit. La préparation est également fonction de l'ancienneté des murs.

Supports neufs

Les travaux d'enduit ne doivent être commencés que sur des maçonneries terminées depuis un délai minimum d'un mois et après mise hors d'eau de la construction. Pour assurer une bonne tenue de l'enduit, il convient de ne l'appliquer que sur des matériaux ayant terminé la plus grosse partie de leur retrait. Pour les surfaces localisées présentant des défauts de planimétrie, il faut prévoir de dresser la surface avec un mortier de composition analogue à celle du corps d'enduit, et éventuellement de l'armer.

Supports anciens

Le mur doit d'abord être débarrassé de toutes traces de revêtements anciens, friables ou non adhérents tels que : enduits dégradés, hydrofuges de surface, peintures, etc. Il pourra être nécessaire, dans certains cas (présence de taches blanchâtres de calcite sur les murs), de procéder à un brossage à la brosse métallique ou à un lavage à l'eau sous pression. Les joints de maçonneries de briques ou de moellons sont dégarnis sur 2 à 3 cm de profondeur et brossés.

1.3.4 - L'exécution d'un enduit traditionnel

Les mortiers pour enduits peuvent être soit dosés et gâchés sur le chantier, soit prédosés en usine (mortiers industriels) ne nécessitant alors qu'un éventuel apport d'eau pour leur gâchage au moment de l'emploi (« mortiers secs » prêts à gâcher).

Pour la première famille, les préconisations de dosage fournies par la norme NF P15-201, en fonction de leur destination et du support, sont résumées dans le tableau page 19, pour les cas les plus courants d'enduits sur maçonneries récentes de blocs béton ou de briques.



En ce qui concerne les mortiers industriels (« mortiers frais » prêts à l'emploi ou « mortiers secs » prêts à gâcher), les spécifications concernant les caractéristiques des mortiers durcis font l'objet de la norme européenne NF EN 998-1.

Selon sa destination et les sollicitations qui en découlent, le mortier doit présenter des performances adaptées, notamment pour la résistance à la compression et l'absorption d'eau. À cet effet, des classes ont été établies par la norme auxquelles pourront faire référence les pièces du marché.

Classification des caractéristiques des mortiers durcis (norme NF EN 998-1, mortiers industriels)

Propriété	*Catégorie*	*Valeurs*
Résistance à la compression à 28 jours	CS 1 CS 2 CS 3 CS 4	0,4 à 2,5 N/mm² 1,5 à 5 N/mm² 3,5 à 7,5 N/mm² ≥ à 6 N/mm²
Absorption d'eau par capillarité	W 0 W 1 W 2	Non spécifié $c \leq 0{,}4$ kg/m². $min^{0,5}$ $c \leq 0{,}2$ kg/m². $min^{0,5}$

Les mortiers industriels sont soumis, depuis 2005, au marquage CE obligatoire qui prévoit la mention des caractéristiques du mortier durci.

Les mortiers pour enduits traditionnels réalisés sur chantier (norme NF P 15-201)

Les liants

Les ciments Portland CEM I et Portland composés CEM II conformes à la norme NF EN 197-1, les ciments à maçonner (norme NF EN 413-1), les chaux hydrauliques ou aériennes éteintes (norme NF EN 459-1) peuvent être utilisés pour la réalisation des enduits.

Pour éviter la tendance à la fissuration, il convient d'utiliser les classes de résistances moyennes.

Le ciment prompt naturel peut être également utilisé seul ou en mélange avec de la chaux ou un ciment Portland. L'emploi du prompt permet de travailler à température plus basse et de réduire les temps d'attente entre les couches.

Les chaux aériennes et les chaux hydrauliques naturelles améliorent la capacité de rétention d'eau. Mélangées au ciment, elles permettent d'obtenir des mortiers bâtards, à la fois onctueux, gras, adhérents et ne se ségrégeant pas.

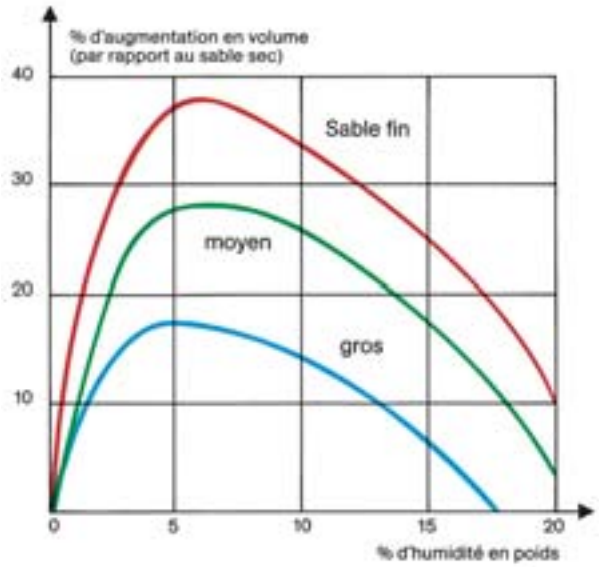
La préférence donnée aux mélanges de ciment et de chaux n'exclut pas pour autant la possibilité d'utiliser des ciments et des chaux hydrauliques à l'état pur. C'est ainsi que la chaux hydraulique naturelle est utilisée pour les mortiers de couche de finition, tandis que le ciment est surtout employé pour la couche d'accrochage.

Les sables

Ils doivent être conformes aux normes NF EN 12620 et NF EN 13139. Le sable doit être sain, siliceux, silico-calcaire ou même calcaire à condition que les grains ne soient pas friables. Il doit être propre, c'est-à-dire dépourvu d'impuretés susceptibles de compromettre la qualité du mortier en œuvre (argile, vase, terre végétale, plâtre, sels minéraux). Le degré de propreté du sable est mesuré par l'essai d'équivalent de sable (voir le chapitre 2.1, tome I). L'indice fourni par cet essai SE doit être supérieur à 75.

Il est préférable d'utiliser des sables roulés de rivière. Les sables de carrière conviennent s'ils ne renferment pas d'impuretés nocives. Les sables de mer doivent être lavés (sinon ils sèchent mal et peuvent donner lieu à des efflorescences en raison des sels qu'ils contiennent). La granulométrie des sables doit être limitée à 4 mm.

En général, les dosages du mortier sont exprimés en poids de liant par m³ de sable sec. Or, le plus souvent, sur le chantier, le sable renferme un certain pourcentage d'eau (pouvant varier de 0 à 20 %) et il suffit de très peu d'eau pour que le



poids du m³ de sable soit modifié ; c'est le phénomène bien connu du « foisonnement » du sable.

Pour éviter des surdosages en liant pouvant conduire à des enduits plus fissurables, il est utile de déterminer la teneur en eau du sable par un essai facile à pratiquer sur chantier (séchage et pesée du sable). À défaut, on prendra un coefficient de foisonnement forfaitaire de 25 %.

Les adjuvants

Il peut s'avérer intéressant d'ajouter un adjuvant au mortier si celui-ci, malgré toutes les précautions prises, n'est pas suffisamment maniable. On utilise alors un plastifiant ou un entraîneur d'air. L'emploi d'un hydrofuge de masse permet de diminuer la capillarité de l'enduit et d'améliorer son imperméabilité. Les adjuvants, éventuellement utilisés, doivent être conformes à la norme NF EN 934-2.

Les produits d'accrochage

Ces produits généralement à base d'émulsion thermoplastiques : copolymères vinyliques, styrène butadiène, acryliques sont destinés à améliorer l'adhérence de l'enduit sur le support lorsque son état de surface le nécessite, ainsi que ses propriétés mécaniques.

Les colorants

Ils doivent être exclusivement d'origine minérale. Leur dosage sera inférieur à 3 % du poids du liant.

La mise en œuvre

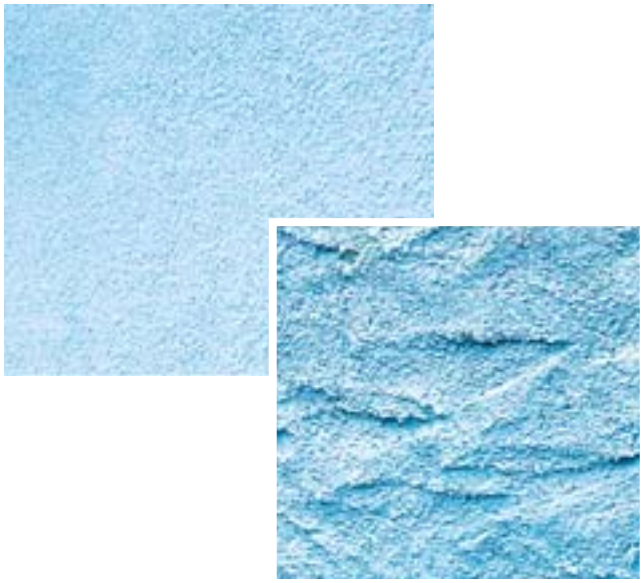
Application manuelle

La réalisation d'un enduit traditionnel se fait en trois couches :
– une première couche dite gobetis ou couche d'accrochage, de 2 à 4 mm d'épaisseur ;
– une deuxième couche formant le corps d'enduit, de 12 à 20 mm d'épaisseur ;
– une troisième couche appelée couche de finition, de 5 à 7 mm d'épaisseur, qui a un rôle décoratif.

Les résistances mécaniques du mortier de chacune des couches constituant l'enduit doivent être dégressives, la plus forte étant donnée au gobetis. Cette exigence conduit à un dosage en liant également dégressif pour les trois couches. Le gobetis est toujours réalisé en mortier de ciment (ou de chaux hydraulique naturelle pour les enduits sur maçonneries anciennes). Les deux couches suivantes sont en mortier de ciment, de chaux ou en mortier bâtard. La nature du liant est choisie selon la nature du support. L'emploi d'un mortier coloré contribue à l'esthétique de la façade.

Les dosages des liants que l'on peut préconiser pour des travaux courants sur maçonnerie ou sur béton sont donnés au tableau suivant à titre indicatif : la norme NF P 15-201 (DTU 26.1) fournit des valeurs de dosage suivant la nature du support. On pourra s'y référer pour plus de précision.

Il faut veiller à la régularité des constituants et des dosages. Les variations de dosages, notamment en eau, peuvent provoquer des variations des caractéristiques, notamment de teinte, de même que les



conditions ambiantes (vent, soleil), qui peuvent conduire à protéger l'enduit frais contre la dessiccation par humidification, bâches de protection ou produits de cure. La compacité de la couche du corps d'enduit est obtenue par un « serrage énergique » du mortier à la taloche.

Application mécanique

L'enduit peut aussi être réalisé en deux couches lorsque le mortier est projeté mécaniquement (machine à projeter, pot de projection). La première couche assure l'adhérence de l'enduit au support et l'éventuel rattrapage des irrégularités, elle a une épaisseur de 10 à 15 mm. La seconde couche donne sa forme définitive à l'enduit et complète la fonction imperméabilisation. Son épaisseur est de 8 à 12 mm. Le mortier est serré énergiquement à la taloche.

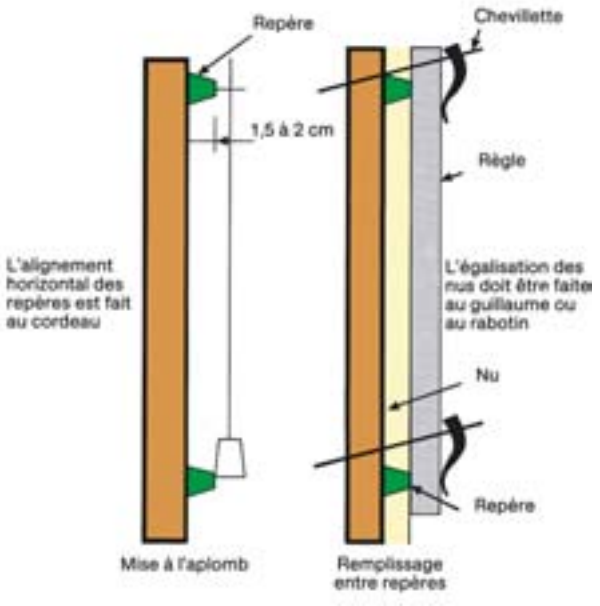
Composition des mortiers d'enduits pour maçonneries récentes de blocs béton ou briques

Couches	***Dosage en liant/m³ de sable sec***			***Sable***	
	Enduits mortier ciment ou chaux	***Enduits mortier bâtard (2e et 3e couches seulement)***	***Enduits mortier bâtard avec chaux aérienne éteinte***	***Granulométrie***	***Éléments fins < 0,08 mm***
1re couche gobetis	500 à 600 kg de ciment CEM I ou CEM II	500 à 600 kg de ciment CEM I ou CEM II	500 à 600 kg de ciment CEM I ou CEM II	0/4	Néant
2e couche corps d'enduit (2)	350 à 450 kg de ciment (1) ou chaux hydraulique	100 à 350 kg de ciment (1) + 100 à 350 kg de chaux hydraulique	200 à 350 kg de ciment (1) et/ou chaux hydraulique naturelle + 100 à 150 kg de chaux aérienne éteinte	0/4	> 5 %
3e couche de finition (3)	250 à 350 kg de ciment (1) ou chaux hydraulique	50 à 200 kg de ciment (1) + 100 à 300 kg de chaux hydraulique	150 à 250 kg de chaux hydraulique ou de ciment + 50 à 150 kg de chaux aérienne éteinte	0/4	Riche en éléments fins

1. Ciment CEM I ou CEM II, classe 32,5 ou 42,5, liant à maçonner ou prompt naturel.
2. Le dosage global en liant est compris entre 350 et 450 kg/m³ de sable sec.
3. Le dosage global en liant est compris entre 250 et 350 kg/m³ de sable sec.

Délais séparant l'application des différentes couches

Les délais minima sont de 48 heures entre la première et la deuxième couche, et de 4 à 7 jours, suivant la nature du liant, entre le corps d'enduit et la couche de finition. Ces délais sont nécessaires pour que le mortier ait effectué la plus grande partie de son retrait.



Application de l'enduit

Un enduit peut être réalisé selon deux méthodes : soit au « jeté » directement, soit entre « nus et repères ». Les travaux courants sont généralement exécutés au jeté directement. Les travaux soignés sont réalisés entre nus et repères. Dans ce cas, des repères sont d'abord placés aux extrémités haute et basse des nus à réaliser. On exécute les nus en garnissant derrière une règle appliquée sur les repères et maintenue par des chevillettes.

1.3.5 - Les enduits monocouches

Ils se distinguent des enduits traditionnels par leur application en une ou deux passes, avec un produit de même composition, préparé en usine et livré en sacs prêts à gâcher. Dosés avec des méthodes industrialisées, les enduits monocouches présentent la sécurité d'une qualité constante et contrôlée dans le cadre de la procédure d'Avis technique.

La composition de ces enduits comporte souvent des charges légères (perlite, vermiculite, ponce) ou des fibres, ainsi que des adjuvants (entraîneurs d'air, hydrofuges) et des rétenteurs d'eau.

Ces enduits font l'objet du document élaboré par le CSTB (Cahier N° 1777 de juin 1982). « Conditions générales d'emploi et de mise en œuvre des enduits d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques ». Leurs performances sont spécifiées par la norme NF EN 998-1.

Conditions d'emploi

Le choix de l'enduit doit être fonction :
– de la nature du support considéré ;
– de l'exposition de la paroi ;
– des moyens et des conditions de mise en œuvre ;
– du type de finition désiré.

L'utilisation de teintes foncées est déconseillée dans tous les cas. En effet, elles augmentent les contraintes d'origine thermique du fait d'une plus forte absorption du rayonnement solaire, et accentuent les problèmes d'aspect liés au nuançage ou aux efflorescences. L'application sur béton cellulaire est prévue pour certains enduits, elle est alors mentionnée dans l'Avis technique.

Application proprement dite

L'application est généralement effectuée en une ou deux passes, de préférence espacées de quelques heures, suivant le type de finition désirée. Lorsque la seconde passe ne peut être effectuée dans les 24 heures, il y a lieu, pour assurer son accrochage, de réhumidifier l'enduit de première passe. La première passe de l'enduit doit être serrée (dressage à la règle ou à la taloche) mais non lissée, et il faut respecter l'épaisseur indiquée par le fabricant.



Mortiers isolants

Ces mortiers très légers, à base de polystyrène expansé ou de liège, ont une densité 2 à 4 fois plus faible que les mortiers classiques, ce qui leur permet d'assurer la fonction isolation thermique en plus des fonctions d'imperméabilisation et d'esthétique.

1.3.6 - Traitements de surface décoratifs

• Le mouchetis tyrolien : obtenu directement par projection au balai ou à la « tyrolienne ».
• Le gratté : l'enduit taloché est gratté à la lame dentelée, en cours de prise, dans les deux ou trois heures suivant l'application.
• Le gratté-grésé : l'enduit gratté est grésé superficiellement aux abrasifs ou raboté superficiellement au chemin de fer.
• Le grésé : l'enduit taloché est grésé aux abrasifs ou raboté au chemin de fer, en cours de durcissement, 2 à 8 jours après l'application.
• Le bouchardé : l'enduit est bouchardé 3 semaines après, à la boucharde à main ou pneumatique.
• Le lavé : les grains sont dégagés par lavage à la brosse souple et au jet d'eau léger.

Le caractère décoratif de l'enduit est apporté non seulement par la finition de surface, mais aussi par la teinte obtenue en jouant sur le choix des sables et sur la coloration de la pâte de ciment par des pigments minéraux. On peut obtenir des intensités de coloration plus ou moins marquées selon le dosage et la nature du ciment utilisé. Pour les teintes claires, on aura souvent intérêt à utiliser des ciments blancs ou des chaux.

1.3.7 - Adhérence de l'enduit : les défauts à éviter

La bonne adhérence d'un enduit sur son support est fondamentale. Il est facile de la vérifier : un enduit décollé localement sonne « creux ». La non-adhérence entraîne la détérioration de l'enduit qui se détachera par plaques. Les principaux défauts d'adhérence sont dus :
– à un support trop lisse ;
– à un béton brut de décoffrage, avec des traces d'huile de démoulage ou de produits de cure ;
– à un support sale avec des dépôts de matière organique ou comportant des traces d'anciens enduits en plâtre ; ce support ne sera pas neutre puisque le plâtre réagira ensuite sur le ciment du mortier pour donner des produits expansifs (sulfo-aluminate de chaux) ;
– à un support trop sec, qui n'a pas été suffisamment humidifié avant la projection de la première couche d'accrochage (gobetis) ;
– au mortier mal composé, appliqué trop tardivement (parfois remouillé, rebattu et dont la prise est commencée) ;
– à un mortier ayant un retrait excessif (surdosage en liant).

Enfin, si certaines précautions ne sont pas prises, de l'eau pourra s'infiltrer entre le support et l'enduit et provoquer son décollement en hiver lors du gel. C'est le cas d'une remontée d'eau du sol, ou d'un enduit non protégé en partie haute. Il convient enfin d'éviter l'application d'enduits par temps froid. Sans précaution particulière, 5 °C est une limite en dessous de laquelle il ne faut pas descendre. Un enduit bien fait tient très longtemps. Sa confection demande du soin, une main-d'œuvre qualifiée, un matériel parfaitement adapté et des mortiers performants.

1.4 Les chapes

1.4.1 - Le rôle de la chape

Le rôle de la chape est d'assurer la mise à niveau de la dalle et la régularité de sa surface. Elle doit aussi présenter une résistance suffisante pour assurer la transmission des charges au support, résister aux efforts d'usure et d'abrasion. Elle peut constituer le support d'un revêtement de sol ou d'un revêtement d'étanchéité. La chape peut enfin participer à l'isolation thermique et/ou acoustique des locaux.

Lorsqu'elle n'est pas destinée à recevoir un revêtement, on peut y incorporer des produits spécifiques, destinés à améliorer ses caractéristiques mécaniques ou son esthétique.

L'exécution des chapes destinées aux bâtiments d'usage courant tels que les logements, les bureaux ou les bâtiments scolaires, fait l'objet de la norme NF P 14-201 (DTU 26.2) « Travaux de bâtiment. Chapes et dalles à base de liants hydrauliques » et la norme NF EN 13813 qui définit les caractéristiques des matériaux pour chapes.

Pour les bâtiments à caractère industriel, agricole ou sportif, les chapes peuvent faire l'objet de prescriptions particulières.

1.4.2 - Les différents types de chapes

En fonction de leur conception et de leur mode d'exécution, on distingue :
– les chapes adhérentes, qui sont incorporées ou rapportées ;
– les chapes flottantes.

Les chapes adhérentes

Les chapes incorporées

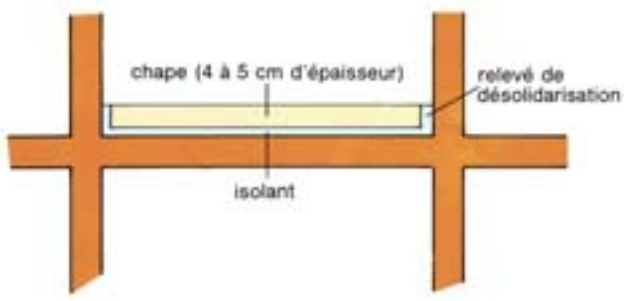
Elles sont constituées par un mortier fin appliqué avant que le béton du support (dalle, massif) n'ait fait sa prise. La continuité entre le béton du support et le mortier de la chape assure à l'ensemble une très bonne cohésion et des conditions de maturation favorables, le support étant encore humide.

Les chapes rapportées adhérentes

Il s'agit du cas le plus fréquent où le béton a déjà fait sa prise. Dans le cas de travaux neufs, la chape est exécutée de préférence le plus tôt possible, après que le béton ait commencé son durcissement. Pour les ouvrages anciens ou du fait des contraintes de chantier, ce choix n'est malheureusement pas toujours possible. Ce type de chape est exécuté chaque fois qu'une dalle béton doit recevoir un revêtement de sol mince collé (moquette, plastique) ou être peinte.

Les chapes flottantes

Il s'agit d'ouvrages totalement désolidarisés, aussi bien du support que des parois verticales, par l'interposition d'une couche de désolidarisation et/ou d'une couche isolante résiliente. Le but de la couche de désolidarisation est la réduction de la transmission des déformations (par exemple les variations dimensionnelles d'une étanchéité par rapport à son support).



Principe de la constitution d'une chape flottante sur couche d'isolation.





Application d'enduit autolissant.



Réalisation d'une couche isolante en argile expansée pour la sous-couche d'une chape flottante.

La couche isolante permet d'apporter une isolation thermique et/ou acoustique – règlementation RT 2005. Cette solution est très efficace vis-à-vis de la transmission des bruits d'impact, ce qui conduit à la préconiser dans les pièces carrelées (salles d'eau, cuisines). L'amélioration de l'isolement aux bruits d'impact obtenue à l'aide d'une chape flottante peut être de l'ordre de 20 à 25 dB (A).

1.4.3 - La réalisation des chapes

Les chapes adhérentes

Les chapes incorporées

Le support béton étant encore frais, il ne nécessite pas de préparation particulière, si ce n'est de s'assurer qu'il présente une surface rugueuse ; dans le cas contraire, il suffit d'un griffage pour obtenir ce résultat.

Le mortier utilisé pour réaliser la chape doit répondre aux spécifications de caractéristiques définies par la norme NF EN 13813 et faire l'objet d'un marquage CE obligatoire. Le mortier comporte un sable de granulométrie n'excédant pas 0/4 mm, et un dosage en ciment Portland de classe de résistance 32,5 au moins égal à celui du béton support, avec un minimum de 350 kg/m^3 de mortier.

Ces chapes sont généralement réalisées en mortier de consistance ferme et ont une épaisseur moyenne de 15 à 25 mm. On peut également utiliser un matériau pour chape fabriqué industriellement ; dans ce cas, le producteur doit respecter les spécifications définies dans la norme NF EN 13813.

Les caractéristiques visées par la norme, en ce qui concerne les produits à base de ciment, sont au minimum les résistances à la compression, à la flexion et à l'usure. D'autres caractéristiques, non obligatoires, peuvent être indiquées par le producteur : dureté de surface, temps de prise, retrait, module d'élasticité…

Les résistances à la compression sont désignées par un C suivi de la classe de résistance allant de 5 à 80 N/mm^2. Pour la résistance, à la flexion, les classes vont de F1 à F50. Le marquage CE, attestant la conformité du produit à la norme NF EN 13813, reprend ces deux caractéristiques dans sa désignation.

Exemple : EN 13813 CT - C 20 - F 4

Pour un produit à base de ciment (CT) présentant sur le matériau durci une résistance à la compression de 20 N/mm^2 et une résistance à la flexion de 4 N/mm^2.

La mise en œuvre du mortier comporte un réglage, un talochage et éventuellement un lissage.

Les chapes rapportées adhérentes

Le béton ayant déjà fait sa prise, la préparation du support doit être dans ce cas très soignée, afin que la liaison avec la chape soit efficace. La surface du support doit être rendue rugueuse par des moyens manuels ou mécaniques, puis soigneusement nettoyée, humidifiée et traitée avec des produits d'accrochage destinés à améliorer l'adhérence de la

chape. Ces produits d'accrochage sont des émulsions à base d'acétates de polyvinyle, de résines acryliques ou de styrènes. On applique en général une première couche d'adhérence (« primaire ») directement sur le support, puis le mortier dans lequel sont incorporés des produits d'accrochage. L'incorporation de ces produits et éventuellement d'adjuvants au mortier est indispensable pour des épaisseurs de chape inférieures à 3 cm ; au-delà, c'est une précaution utile.

Le dosage en ciment des mortiers est au minimum de 350 kg/m³. De la même façon que pour les chapes incorporées, on peut utiliser des mortiers industriels répondant aux exigences précédemment décrites, conformes à la norme NF EN 13813.

Le mortier est étalé sur la surface, puis réglé, taloché et éventuellement lissé.

Les chapes flottantes

Ces chapes sont dites flottantes parce qu'elles supposent l'interposition, entre la dalle support et la chape proprement dite, d'une couche de désolidarisation (constituée d'un film polyéthylène, d'un lit de sable ou d'un feutre bitumé), ou d'une sous-couche isolante (panneaux de fibres, plastique alvéolaire, béton de granulats légers tels qu'argile expansée, vermiculite ou liège), lorsque sont recherchées des performances thermiques ou acoustiques. La mise en œuvre de la sous-couche isolante fait l'objet de la norme NF P 61-203.

La chape est réalisée au mortier dosé au minimum à 350 kg/m³ de ciment de classe 32,5. Selon la compressibilité de l'isolant, la chape a une épaisseur de 4 à 5 cm, et peut être armée ou non. L'armature utilisée est alors un treillis à petites mailles de 50 x 50 mm (grillage) avec fils d'acier de 1 à 1,5 mm de diamètre, placé à mi-épaisseur. On peut remplacer le treillis par des fibres polypropylène bénéficiant d'un Avis Technique.

Les enduits de lissage pour sols intérieurs (enduits autolissants)

La surface de la chape peut être finie grâce à l'application d'enduits de lissage, à base de liants hydrauliques, de charges minérales, de résines et d'adjuvants spécifiques ; ils ont pour caractéristique d'être autolissants. Ces enduits très fluides s'appliquent en épaisseur de 3 à 10 mm, et sont destinés à recevoir directement les revêtements de sols habituels : textiles, plastiques, céramiques.

Les enduits de lissage sont conditionnés par le fabricant, de façon à ne nécessiter que l'adjonction d'eau de gâchage et éventuellement d'une résine fournie avec l'enduit.

Les finitions spéciales

Lorsqu'une résistance à l'usure est recherchée, on peut incorporer à la surface de la chape des granulats durs (corindon, carborandum), ou des fibres d'acier, qui améliorent la résistance à l'abrasion et aux chocs.

Les joints de fractionnement

Lorsque le gros œuvre comporte des joints, la chape doit être fractionnée aux mêmes emplacements ; dans tous les cas les joints sont exécutés pour des surfaces de l'ordre de 25 m². La distance entre les joints est au maximum de 8 m cependant 5 m sont préférables.

Les joints de fractionnement sont exécutés soit par sciage du mortier frais ou durci, soit par profilés disposés avant mise en place du mortier.

La cure du mortier

La cure est l'opération destinée à éviter la dessiccation du mortier par temps chaud ou sur des chantiers exposés à d'importants courants d'air. Elle peut être réalisée en protégeant la surface du mortier frais par des bâches (films plastiques) ou des sacs humides, par humidification ou par pulvérisation d'un produit de cure.

1.4.4 - Les chapes pour sols industriels

Les exigences d'un sol industriel peuvent être multiples :
– résistance mécanique aux chocs, aux poinçonnements, à l'abrasion ;
– résistance aux attaques chimiques : acides, sels minéraux, corps gras, sucres ;
– résistance à des températures élevées.
Le sol lui-même doit être conçu pour résister à différentes contraintes, mais la chape, qui est la partie la plus sollicitée, nécessite un traitement particulier par rapport aux réalisations usuelles.

Les mortiers utilisés sont des mélanges prédosés comprenant généralement un composant à base de ciment et de charges spéciales minérales ou métalliques et un composant qui est une résine. Le mélange se fait au moment de la mise en œuvre, et permet de réaliser un mortier de type autolissant appliqué en épaisseur appropriée.

L'incorporation au mortier ou le saupoudrage sur le mortier déjà mis en œuvre et encore frais, de granulats très durs, minéraux type corindon ou particules métalliques, permet d'obtenir des chapes très résistantes.

Pour la réalisation des chapes industrielles, compte tenu de leur résistance à de nombreux agents chimiques et de leur résistance mécanique aux jeunes âges, permettant une mise en service rapide, on emploie des ciments de classe de résistance élevée ainsi que le ciment prompt naturel et les aluminates de calcium.

La résistance d'aluminates de calcium, associé à des granulats réfractaires, à des températures dépassant 1 000 °C, le fait également utiliser pour les sols soumis à des températures élevées – industries métallurgiques, verreries.

En milieu rural ou dans les industries agro-alimentaires, la réalisation de chapes résistant aux agressions chimiques nécessite l'emploi de liants adaptés : ciment prompt naturel, aluminates de calcium, CEM V, CEM III/C.

Ces différentes réalisations se faisant en épaisseur relativement mince, nécessitent un traitement de cure, de façon à assurer une maturation correcte du mortier sans risque de dessiccation.



Une chape réalisée en mortier à base de ciment courant à caractéristiques complémentaires normalisées PM ES retenu pour sa résistance aux acides dans une laiterie.

1.5 Les scellements et les calages

1.5.1 - Les domaines d'emploi

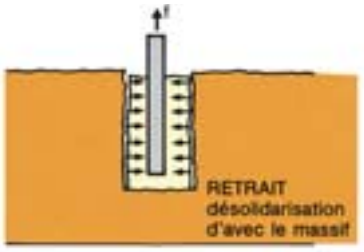
L'évolution des techniques de construction, le positionnement précis de pièces préfabriquées, le scellement d'éléments rapportés sur béton, entraînent une utilisation croissante de produits de scellement et de calage.

Parmi les multiples utilisations, on peut citer :
– calage d'équipements industriels, machines lourdes à forts couples ou à fortes vibrations ;
– scellement de poteaux, poutres, acrotères… ;
– scellement de portes, fenêtres et éléments de second œuvre ;
– scellement de mobilier urbain, d'éléments de signalisation ;
– travaux de scellement en milieu marin ;
– assemblage d'éléments en béton ;
– scellement de regards de visite sur routes à fort trafic avec remise en circulation quasi-immédiate.

1.5.2 - Les exigences

Absence de retrait

La principale caractéristique de ces mortiers est de présenter peu ou pas du tout de retrait, inacceptable pour les travaux de scellement ou de calage. Pour parvenir à ce résultat, un bon mortier de scellement ou de calage doit être sans retrait ou « à retrait compensé ». Un mortier classique peut en effet prendre un retrait excessif et ne plus jouer son rôle en se désolidarisant de l'entourage (décollement, apparition de fissures).

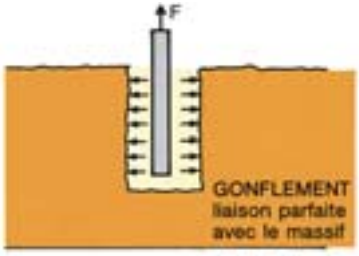


Le retrait d'un mortier mal étudié a pour conséquence la désolidarisation scellement/support.

Il convient donc de prendre les précautions habituelles pour éviter le retrait du mortier au cours de son durcissement – c'est-à-dire ne pas exagérer la teneur en eau de gâchage et assurer la protection du mortier frais contre la dessiccation (absorption par le support ou évaporation).

Caractère expansif du mortier

Afin d'éviter les conséquences du retrait, les produits spéciaux de scellement et de calage sont généralement réalisés à partir de matériaux expansifs : poudres métalliques (oxydes de fer, aluminium), oxydants (expansion après la prise due à la rouille formée).



L'expansion du mortier dans un scellement crée un phénomène d'autoblocage.

Une autre technique couramment utilisée consiste à provoquer une expansion cristalline par formation de sulfo-aluminate de chaux (ettringite). L'expansion libre peut varier de 0,5 à 2 % en volume.

Résistance au jeune âge

Elle est indispensable pour répondre aux délais courts imposés par ce type de travaux. Elle est obtenue par une composition appropriée ; le liant est généralement un ciment de classe R (durcissement rapide) ou un ciment spécial à durcissement rapide : ciment prompt ou ciment alumineux.

Autres caractéristiques

– Une faible porosité assurant la protection des pièces métalliques contre la corrosion ;
– une bonne fluidité pour les mortiers de calage qui doivent remplir des volumes à large section et faible épaisseur.

1.5.3 - La composition

Qu'ils soient prédosés ou fabriqués sur chantier, les mortiers de scellement font appel à des constituants bien définis, qui doivent être d'une très bonne qualité :
– ciments à forte résistance de classe 52,5 ou 42,5, en général à durcissement rapide (classe R), ciment prompt, aluminates de calcium ;
– sable très propre (roulé de préférence) d'un diamètre maximum de 2 ou 3 mm ;
– expansifs ;
– adjuvants divers (plastifiants, rétenteurs d'eau, accélérateurs, résines) ; il existe des mortiers comportant des fibres d'acier (de préférence inoxydables) ou de polypropylène.

Les dosages en liant sont généralement élevés (600 à 700 kg de ciment pour 1 m³ de sable). Le dosage en eau doit être ajusté selon la consistance recherchée : E/C compris entre 0,40 et 0,50.

1.5.4 - Les scellements

Scellement de tiges

Le scellement de tiges ou de barres d'acier dans le béton est un des cas les plus fréquents. La profondeur et le diamètre du trou doivent tenir compte de la longueur du scellement et du diamètre de la barre, ainsi que de la granulométrie du mortier de scellement.

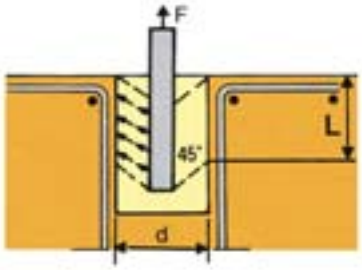
D'une manière générale, on adoptera pour diamètre du trou celui de la barre (Ø) majoré de dix fois la dimension du plus gros grain du mortier (D) :

$$d = Ø + 10\ D$$

La longueur utile L du trou est inversement proportionnelle à son diamètre.

Le diamètre du trou détermine la longueur utile L suivant laquelle sont transmis les efforts d'arrachement au support.

On se tiendra aussi près que possible de cette limite : on n'a jamais intérêt à agrandir le diamètre d'un trou de scellement.



En effet, la longueur utile L du support qui reprend les efforts d'arrachement transmis par le mortier de scellement, selon un angle de 45°, est inversement proportionnelle au diamètre du trou.

Le support devra comporter les armatures nécessaires à la reprise locale des efforts, et à leur transmission aux parties résistantes de la pièce.

À titre d'exemple, on peut fournir des valeurs d'arrachement mesurées avec des barres scellées dans du béton avec un mortier à retrait compensé.

Valeurs d'arrachement mesurées avec des barres scellées dans du béton avec un mortier à retrait compensé				
Diamètre des tiges (en mm)	12	16	20	25
Longueur de scellement (en mm)	200	300	400	600
Effort d'arrachement (kgf)*	4500	9000	15000	28000

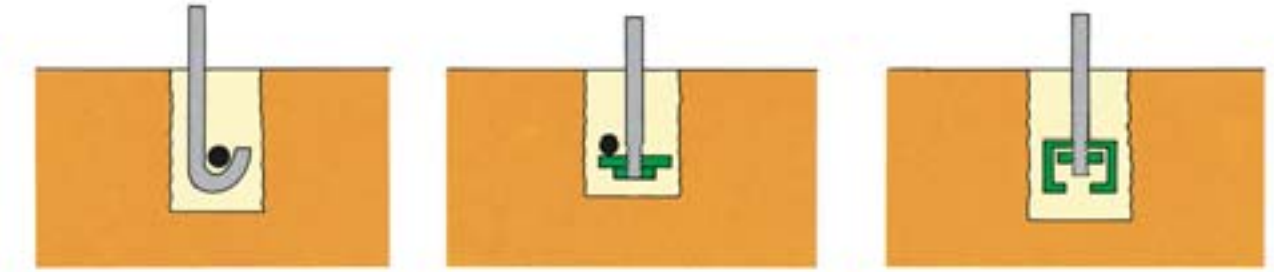
Scellement de regards

Dans la voirie, le scellement de regards, grilles, etc., est de pratique courante. Cette utilisation demande, en plus des performances mécaniques et de compensation du retrait nécessaires à tout scellement de qualité, une montée rapide des résistances, afin de rétablir la circulation dans les délais les plus brefs.





Exemples de dispositifs destinés à améliorer le scellement d'une barre.



Assemblage d'éléments préfabriqués

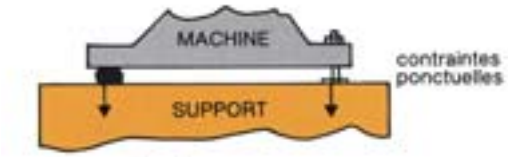
Assembler de tels éléments c'est assurer entre eux une liaison. C'est une opération qui ressemble fort à un scellement : on cherche en effet un bon remplissage des volumes avec néanmoins un blocage efficace et une bonne adhérence. Les règles élémentaires décrites à propos des scellements s'appliquent de la même manière. On utilise un mortier à consistance plastique.



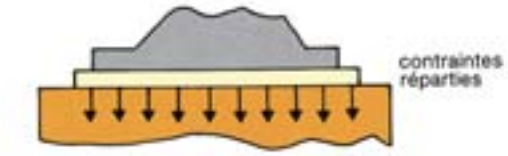
Injection d'un mortier de scellement.

1.5.5 - Le calage

Caler une pièce ou une machine, c'est faire en sorte qu'elle repose, selon un positionnement précis, de façon solide et fixe sur un support.



Calage mécanique.



Calage réparti avec un matériau à base de liant hydraulique.

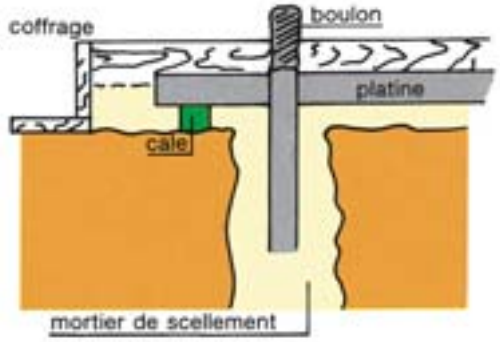
Une méthode consiste à utiliser des cales très diverses (empilement de cales, cales usinées, coniques, cales à vérins, à vis de réglage…). Elle est longue, coûteuse, délicate (mise à niveau difficile). Les charges s'exercent sur des sections faibles de mortier traditionnel.

La méthode utilisant des mortiers spéciaux permet un positionnement plus rapide et un réglage plus économique (vis de réglage et vérins récupérables). Les charges sont réparties sur une large section de contacts par l'intermédiaire d'une épaisseur de mortier ou de coulis réduite. L'adhérence est excellente grâce à la liaison intime avec la fondation. Suivant les problèmes à résoudre, propres à chaque cas, et suivant la dimension des espaces à remplir, on utilise des coulis ou des mortiers plus ou moins fluides, sans ressuage.

Le mortier de calage doit conserver sa fluidité pendant tout le temps de la mise en place (qui peut dépasser largement une heure dans le cas des très grandes machines). Malgré cette fluidité, il doit

rester homogène et sans retrait ultérieur qui aurait pour effet d'interrompre la liaison support-objet, d'entraîner une concentration des charges sur les cales mécaniques et une corrosion en sous-face.

Les applications sont nombreuses :
– calages de plaques d'appui de toutes sortes, de supports métalliques ;
– calages de rails de ponts roulants ;
– calages de socles de machines, tournantes ou non, susceptibles de générer des vibrations (turbines, presses, machines-outils, laminoirs, alternateurs…) ;
– calages de haute précision ;
– ainsi que des blocages plus ou moins importants, et parfois des réparations, des reprises en sous-œuvre, des assemblages d'éléments (en génie nucléaire), etc.



Un calage est presque toujours associé à des scellements.

Les mortiers (ou coulis) de calage sont mis en place soit par injection, soit par gravité.



Tiges scellées.



Calage de machines.

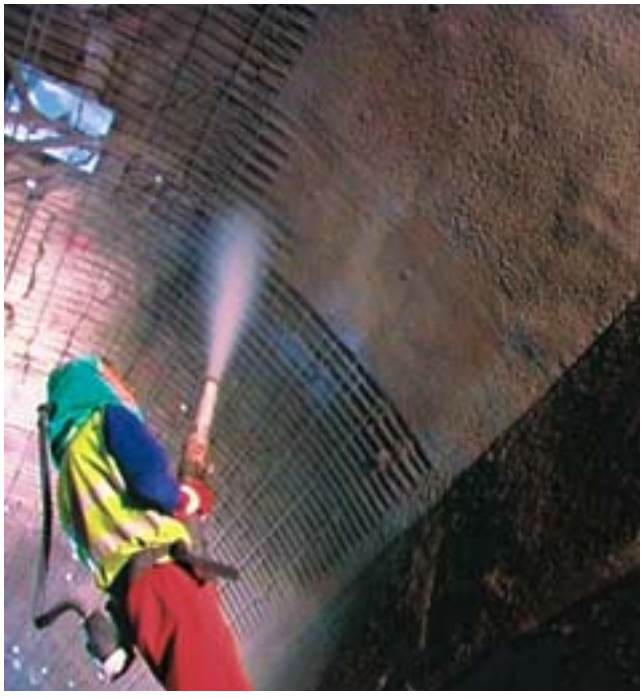
1.6 Les mortiers et coulis de réparation

1.6.1 - Quand répare-t-on ?

Il arrive que, du fait de causes accidentelles, d'une utilisation anormale, de défauts de mise en œuvre, des désordres apparaissent dans les ouvrages en béton. Certains sont acceptables et ne nécessitent pas une intervention immédiate, d'autres peuvent être préjudiciables à la durabilité de l'ouvrage et nécessitent des réparations.

Nous ne traitons pas ici des désordres mettant en cause la stabilité de l'ouvrage, qui font l'objet de travaux de renforcement avec remplacement ou adjonction d'armatures.

Les réparations envisagées dans cette Fiche technique concernent le reprofilage du béton au voisinage de sa surface pour reconstituer l'enrobage des armatures, rétablir l'étanchéité ou remédier à des défauts d'aspect, ainsi que le traitement des fissures stabilisées.



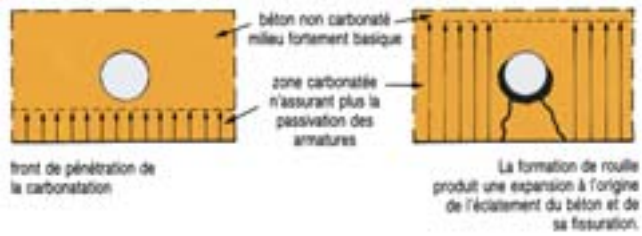
Réparation par projection : le mortier adhère fortement.

1.6.2 - Les causes des dégradations

Les dégradations du béton trouvent leur origine dans des phénomènes usuels et bien connus, tels que la carbonatation ou les influences de la pluie, de la chaleur ou du gel. Elles peuvent être aussi occasionnées par des causes ponctuelles ou accidentelles, telles que les surcharges ou les incendies. Ces différentes causes peuvent être classées suivant leur origine.

Phénomènes purement chimiques

La carbonatation du béton est due à l'action du gaz carbonique de l'air sur la chaux, produite par l'hydratation du ciment. La carbonatation, non gênante pour le béton lui-même, a pour effet de diminuer la basicité du milieu qui constitue la protection de l'acier des armatures, assurée par un phénomène de passivation.



La disparition de cette passivation expose donc les armatures à la corrosion, qui va non seulement affecter la capacité portante du béton armé, mais aussi faire éclater le béton du fait de l'expansion de la rouille. La carbonatation progresse lentement de la surface vers le cœur du béton, d'autant moins vite que le béton est moins poreux et mieux dosé en ciment (au minimum 350 kg/m^3).

Les agressions d'origine chimique peuvent être provoquées aussi par l'eau, qu'elle soit pure ou au contraire chargée en sels plus ou moins actifs (chlorures, sulfures, sulfates).

L'eau de pluie, l'eau de mer et plus généralement les eaux chargées en sels, l'eau de la nappe phréatique, les eaux de lavage constituent autant de cas d'espèces, dont l'action peut se traduire par un lessivage du béton qui dissout la chaux et augmente sa porosité, ou par des réactions conduisant à la production de sels expansifs à l'origine de fissures ou d'éclatement du béton.

Phénomènes physiques

Il peut s'agir des actions mécaniques telles que chocs, vibrations, abrasion, ou des actions liées aux variations de température : dilatation due à la chaleur, effets du gel, chocs thermiques.

Phénomènes physico-chimiques

Ils sont inhérents au béton lui-même, comme ceux liés aux phénomènes complexes du retrait, ou aux réactions se développant à l'interface des constituants. Ils peuvent être provoqués par des agressions extérieures ; l'action des sels de déverglaçage en est l'exemple le plus significatif.

1.6.3 - La reconstitution du béton de surface

Les domaines d'application

Il s'agit de reconstituer le béton dégradé, pour des surfaces localisées, sur une épaisseur allant de quelques millimètres à 4-5 cm maximum. C'est le cas courant des ragréages de parement, des réparations d'épaufrures ou de reconstitutions du béton d'enrobage d'armatures ou d'appuis de balcons.

Le but de ces réparations est aussi bien esthétique que technique. Elles permettent de redonner à l'ouvrage la protection requise et, en béton armé, de préserver les armatures.

Les mortiers utilisés

Fabriqués sur chantier, prêts à l'emploi ou prédosés, les mortiers doivent satisfaire des exigences diverses, qui varient en fonction de la nature de la réparation et des conditions d'application ou d'environnement : température, délais, accessibilité. Ils sont soit à base de liants hydrauliques, soit à base de liants de synthèse. Ils doivent dans tous les cas présenter des caractéristiques compatibles avec celles du support, notamment du point de vue de sa déformabilité, de sa dilatation et, bien entendu, chimiquement. Ces conditions sont remplies avec les mortiers à base de liants hydrauliques. Ils doivent également permettre d'assurer une bonne adhérence au support et apporter par leur faible porosité une protection efficace aux armatures.

Les mortiers à base de liants hydrauliques

Les liants utilisés dépendent des caractéristiques attendues du mortier. Le dosage est au minimum de 450 kg de ciment par m^3 de mélange. Pour améliorer les caractéristiques d'adhérence, de résistance mécanique ou de rhéologie, on utilise souvent des adjuvants, des résines à base de styrènes, d'esters de polyvinyles ou d'époxydes, ainsi que des fibres de verre, de polypropylène ou d'acier. Le sable utilisé pour ces mortiers est un sable fin de granulométrie voisine de 0/3 mm.

Mortiers à base de liants de synthèse

Ce sont des mortiers qui contiennent environ 50 % de granulats (sables et fillers) et 10 % de résine époxyde, polyuréthane ou polyester. Des charges, des adjuvants ou des fibres peuvent entrer dans leur composition. Ces mortiers sont de préférence prédosés et réservés à des réparations de faibles dimensions.

L'exécution des réparations

Préparation des supports

C'est une phase capitale qui conditionne la qualité de la réparation. Le béton est débarrassé des parties non adhérentes ou dégradées par piquage, brossage et dépoussiérage. Les armatures apparentes sont dégagées par enlèvement du béton non adhérent, puis éventuellement décapées par sablage ou grenaillage.

Lorsque l'épaisseur du béton d'enrobage est faible ou en atmosphère agressive, on procède à un traitement de passivation des aciers avec des matériaux tels que les oxydes de zinc ou les époxydes-zinc.







Une réparation nécessite différentes opérations : la passivation des armatures, la mise en place d'un mortier.

La procédure sera la suivante :
– dégager complètement les armatures corrodées à traiter jusqu'aux aciers sains ;
– éliminer les parties corrodées sur toute la surface de l'armature par brossage métallique, repiquage, sablage ou grenaillage ;
– éliminer toutes poussières résiduelles soit à sec, par brossage, soit par lavage à l'eau en fonction des produits de réparation utilisables sur support sec ou humide ;
– en fonction du diamètre résiduel de l'acier corrodé, prévoir ou non son remplacement ;
– enduire la surface de l'acier d'un produit de protection anti-corrosion (passivant acier) compatible avec le produit de réparation ;
– reconstituer l'enrobage des armatures avec un produit de réparation certifié ou spécifique selon la nature du béton, sa localisation, son traitement ;
– après réparation, l'ensemble de la surface pourra être traité à l'aide d'un inhibiteur de corrosion qui va renforcer la protection des armatures par action chimique (inhibiteur de type monofluorophosphate ou amino-alcool). Dans le cas présent cette phase est indispensable compte tenu du faible enrobage des armatures.

Mise en œuvre du mortier

Après mouillage de la surface ou application d'une couche d'accrochage, le mortier est mis en œuvre, soit manuellement avec ou sans coffrage selon les dimensions de la réparation et la thixotropie du mortier, soit par projection.

L'avantage de la projection, surtout par voie sèche (eau introduite au niveau de la lance de projection), est lié à la vitesse à laquelle le matériau est projeté sur le support (jusqu'à 100 m/s).

Dans ce cas, le mortier a une forte adhérence au support, une faible porosité, des caractéristiques mécaniques élevées. Lorsqu'une forte imperméabilisation est recherchée, une couche de protection complémentaire est généralement appliquée sur le mortier de réparation. Les matériaux utilisés pour cette protection sont en général à base de liants hydrauliques et de résines.

1.6.4 - Le traitement des fissures

Les domaines d'application

La fissuration du béton, conséquence de phénomènes physico-chimiques ou mécaniques variés, ne présente pas toujours un caractère justifiant sa réparation, en particulier lorsqu'il s'agit de fines fissures de l'ordre du 1/10 mm qui n'affectent pas sa pérennité. En revanche, à partir de 2 à 3 dixièmes de millimètre, on peut être conduit à envisager un traitement par injection, qui fait appel à des matériaux différents selon l'ouverture de la fissure et son degré de stabilisation.

Les recommandations élaborées par le STRRES (Syndicat national des entrepreneurs spécialistes en travaux de réparation et de renforcement de structures) font la distinction suivante entre les fissures :
– supérieures à 10 mm ;
– comprises entre 1 et 10 mm ;
– comprises entre 0,5 et 3 mm ;
– inférieures à 0,5 mm.

Matériaux utilisés pour le traitement des fissures

Le tableau ci-contre, tiré notamment des recommandations du STRRES*, résume la nature des produits de traitement selon le type de fissures à traiter.

> **Nota**
> *1. Il faut remarquer que ces traitements s'appliquent essentiellement à des fissures « passives » (fissures stabilisées).*
> *2. Les mortiers préconisés pour les fissures supérieures à 10 mm sont dosés à au moins 400 kg de ciment/m³ et font fréquemment appel à des adjuvants : plastifiants ou hydrofuges.*

Mise en œuvre des mortiers et coulis

Le matériel utilisé pour injecter les résines (pots d'injection, pompes et injecteurs) n'est pas développé ici. Avant application du mortier ou du coulis, le support doit être soigneusement préparé par brossage, décapage des lèvres des fissures les plus larges et dépoussiérage. Si nécessaire, les fissures sont nettoyées à l'air comprimé ou sous jet d'eau.

L'injection du produit de réparation est faite, selon les cas, par gravité ou à l'aide d'injecteurs disposés tous les 30 à 40 cm le long de la fissure, alimentés par une pompe travaillant à une pression comprise entre 0 et 3 MPa.

Nature des produits de traitement selon le type de fissures à traiter

Ouverture des fissures	Type de mélange	Nature physique et chimique	
Supérieure à 10 mm	Mortier : (sable + ciment + adjuvants éventuels) Conditionnement possible en mélange prêt à l'emploi	Consistance fluide proche de celle d'un coulis	
Comprise entre 1 mm et 10 mm	Coulis de ciment pur	Suspension de ciment dans l'eau	
	Coulis de ciment + bentonite	Suspension de ciment et de bentonite dans l'eau	
	Coulis de ciment à retrait compensé	Suspension de ciment avec entraîneur d'air	
	Coulis de ciment + résines thermostatiques	Suspension de ciment et émulsion de…	styrène butadiène
			ester polyvinyle
	Coulis spéciaux avec minéralisateur	Suspension de ciment et de minéralisateur dans l'eau	
	Hydrocarbone avec ou sans ciment	Suspension ou émulsion	
	Résine époxyde chargée	Polymère thermodurcissable : résine + durcisseur + charge	
	Polyuréthane gonflant Acrylique	Polymère thermodurcissable : résine + durcisseur	
Comprise entre 0,5 mm et 3 mm	Époxydes	Polymère thermodurcissable : résine + durcisseur	
	Polyuréthanes élastiques	Polymère thermodurcissable : résine + durcisseur	
	Acryliques	Polymère thermodurcissable : solution aqueuse. Résine + durcisseur + accélérateur	
	Coulis de ciment avec minéralisateur	Suspension de ciment et de minéralisateur (silicate) dans l'eau	
Inférieure 0,5 mm	Époxydes	Polymère thermodurcissable : résine + durcisseur	
	Acryliques	Polymère thermodurcissable : solution aqueuse. Résine + durcisseur + accélérateur	
	Minéralisateur pur	Solution aqueuse (silicate)	
	Polyester Aminoplaste Phénoplaste	Polymère thermodurcissable : solution à deux ou trois composants	

** Syndicat d'entrepreneurs spécialisés dans les travaux de réparation : STRRES, 3, rue de Berri, 75008 Paris.*

Chapitre 2

Les bétons courants

2.1 Le béton : connaissance du matériau

2.2 Domaines d'emploi et fonctions du béton

2.3 Formulation des bétons courants

2.4 Le béton prêt à l'emploi – BPE

2.5 Les bétons : fabrication et transport

2.6 Mise en œuvre du béton sur chantier

2.7 Le bétonnage par temps chaud ou par temps froid

2.8 Les coffrages de chantier

2.9 La vibration du béton sur chantier

2.1 Le béton : connaissance du matériau

2.1.1 - Historique

L'ingénieur Bélidor, auteur de *L'architecture hydraulique* (1737) étudia la composition du béton et introduisit le mot béton dans son sens actuel.

L'invention du ciment par Louis Vicat en 1817, celle du ciment Portland par Aspdin en 1824 et l'installation des premiers fours par Pavin de Lafarge au Teil en 1830 préparent l'avènement du béton. Les premières cimenteries se développent en France entre 1850 et 1860, dans le Boulonnais avec la Société des Ciments Français.

C'est en fait le mariage ciment-métal, appelé ciment armé, puis béton armé, qui va donner au béton son plein essor. Le premier exemple est la barque de Lambot (1848), le plus significatif, l'immeuble Hennebique à Paris (1898).

Au xx^{e} siècle, le béton se développera considérablement et, parallèlement, l'évolution de ses techniques : usage croissant des adjuvants, béton prêt à l'emploi, matériel de mise en œuvre, mise au point du béton précontraint par Freyssinet. Plus récemment, les progrès réalisés dans les bétons de hautes performances lui donnent ses lettres de noblesse dans le bâtiment, avec une réalisation comme l'Arche de la Défense, ou en génie civil : pont de l'Île de Ré, pont sur l'Élorn, pont de Normandie, Viaduc de Millau.

2.1.2 - Le béton, pour quoi faire ?

Performances et souplesse d'emploi permettent au béton d'être présent dans tous les domaines du bâtiment et du génie civil.



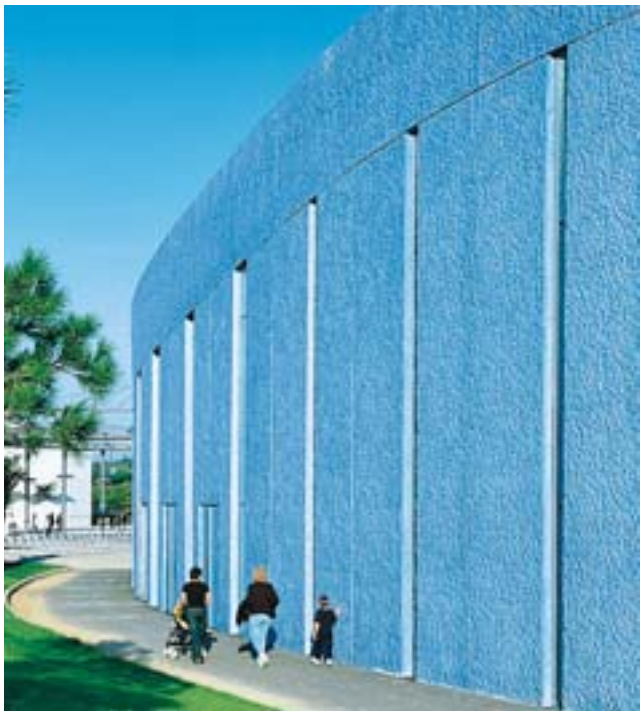
65 ans séparent le nouveau pont sur l'Élorn du pont Albert Louppe conçu et réalisé par Freyssinet en 1928.

Le béton fait partie de notre cadre de vie. Il a mérité sa place par ses caractéristiques de résistance, ses propriétés en matière thermique, sa résistance au feu, son isolation phonique, sa durabilité, ainsi que par la diversité qu'il permet dans les formes, les teintes et les textures. Le béton a sa place dans les bâtiments d'habitation (logements, écoles, hôpitaux, etc.) aussi bien que dans les constructions liées à l'activité professionnelle (usines, ateliers, commerces, bureaux) ou dans des réalisations diverses (socio-culturelles, sportives ou de loisir, etc.).



Le béton structure et participe de manière visible à l'architecture. Le béton n'est plus une « pierre artificielle », mais un matériau adapté aux formes élancées, propres aux ouvrages d'art, au même titre qu'aux exigences des réalisations actuelles des architectes.

Le béton permet de franchir. Grâce à la précontrainte, le béton a pu améliorer ses performances et rend possible les très longues portées. Les dernières évolutions techniques concernent la précontrainte extérieure et l'allégement des âmes des tabliers, en particulier par l'utilisation de structures treillis.



Le béton est dans les routes. Supprimant pratiquement toutes les servitudes inhérentes à l'entretien, le béton routier s'est fait sa place dans tous les types de voiries, de l'autoroute au chemin de vignoble, en passant par les pistes cyclables. Dans les villes, les dalles et les pavés en béton apportent leur esthétique particulière, en harmonie avec le mobilier urbain.





2.1.3 - Quels bétons ?

Le béton varie en fonction de la nature des granulats, des adjuvants, des colorants, des traitements de surface, et peut ainsi s'adapter aux exigences de chaque réalisation, par ses performances et par son aspect.

• Les bétons courants sont les plus utilisés, aussi bien dans le bâtiment qu'en travaux publics. Ils présentent une masse volumique de 2 500 kg/m³ environ. Ils peuvent être armés ou non, et lorsqu'ils sont très sollicités en flexion, précontraints.

• Les bétons lourds, dont les masses volumiques peuvent atteindre 6 000 kg/m³ servent, entre autres, pour la protection contre les rayons radioactifs.

• Les bétons de granulats légers, dont la résistance peut, néanmoins, être élevée, sont employés dans le bâtiment.

• Les bétons cellulaires peuvent répondre aux problèmes d'isolation dans le bâtiment.

• Les bétons fibrés, plus récents, correspondent à des usages très variés : dallages, éléments décoratifs, mobilier urbain.

• Les BHP, les BAP, les BFUP (voir G11, chapitre 3 les nouvelles performances des bétons).

2.1.4 - Qu'est-ce que le béton ?

Le béton est un mélange de plusieurs composants : ciment, eau, granulats et, le plus souvent, adjuvants qui constituent un ensemble homogène. Les composants sont très différents : leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants, de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m³ ; les dimensions de leurs grains s'échelonnent de 0,5 µm (grains les plus fins du ciment) à 25 mm (gravillons).

Dans les bétons où une très grande compacité est recherchée (tels que les Bétons à Hautes Performances, par exemple), la dimension des éléments les plus fins peut descendre en dessous de 0,1 µm (fillers, fumée de silice). De même les granulats très légers ont des masses volumiques inférieures à 100 kg/m³.

La pâte (ciment + eau), élément actif du béton enrobe les granulats. L'objectif est de remplir les vides existants entre les grains. La pâte joue à l'état frais le rôle de lubrifiant et de colle à l'état durci.

Ordre de grandeur des proportions des constituants d'un béton courant

Constituants	*Eau*	*Air*	*Ciment*	*Granulats*
Volume (en %)	14-22	1-6	7-14	60-78
Poids (en %)	5-9		9-18	65-85

La confection d'un béton approprié à sa destination consiste, à partir d'études graphiques ou expérimentales, à déterminer et à optimiser la composition granulaire et le dosage des divers constituants.

Le ciment

Le choix du type de ciment et son dosage dépendent à la fois des performances recherchées (résistance mécanique, résistance aux agents agressifs) et de la nature des autres composants. Sans détailler les critères de choix du ciment (voir *Fiches techniques*, tome 1) on peut rappeler quelques règles.

• Pour un béton courant, on utilise des ciments de type CEM I, CEM II, CEM III, CEM III/C, ou CEM V, alors que le ciment à maçonner et la chaux hydraulique sont réservés à la préparation de mortiers pour maçonneries.

• Pour les bétons armés, la classe de résistance 32,5 est au minimum retenue.

• Pour des travaux en ambiance agressive, on utilise des ciments pour travaux à la mer PM, norme NF P 15-317, ou des ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates ES, norme NF P 15-319.

• Le ciment prompt naturel et le ciment d'aluminates de calcium fondu sont utilisés pour leur durcissement rapide (réparations, scellements), mais aussi pour leur résistance aux ambiances agressives.

• La classe R est utilisée chaque fois que l'on cherche des résistances élevées au jeune âge : préfabrication avec cycle de démoulage court, bétonnage par temps froid.

• Les ciments blancs se prêtent bien à la réalisation de bétons architectoniques. Ils peuvent être également teintés à l'aide de pigments minéraux.

Dosage en ciment : les critères

Le dosage en ciment dépend de plusieurs critères tels que le type de béton, la destination de l'ouvrage, la résistance requise, les actions environnementales auxquelles le béton est soumis. Le dosage n'est pas déterminé par un calcul théorique absolu, mais il résulte de l'application de règles dont la pertinence a pu être appréciée à l'usage et vérifiée expérimentalement. La norme NF EN 206-1 fournit les dosages minimaux à respecter selon les classes d'exposition des bétons, en fonction des actions environnementales (humidité, milieu marin, agressions chimiques, cycles gel-dégel).

Dosage en ciment et résistances mécaniques

Le dosage en ciment a une influence directe sur les résistances mécaniques du béton. Toutes autres conditions égales par ailleurs, on peut dire que dans une certaine plage (300 à 400 kg/m³ de béton) la résistance est sensiblement proportionnelle au dosage en ciment.

L'eau

Nécessaire à l'hydratation du ciment, elle facilite aussi la mise en œuvre du béton (effet lubrifiant) dans la mesure où on n'abuse pas de cette influence par un excès d'eau qui diminue les résistances et la durabilité du béton. L'eau doit être propre et ne pas contenir d'impuretés nuisibles (matières organiques, alcalis). L'eau potable convient toujours. Le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. La quantité d'eau varie avec un très grand nombre de facteurs (dosage en ciment, granulats, consistance recherchée du béton frais) ; elle est en général comprise entre 140 et 200 l/m³. Il convient de tenir compte de l'eau apportée par les granulats. Il est souvent utile de contrôler la plasticité à l'aide d'essais simples connus.
Le rapport E/C est un critère important des études de béton ; c'est un paramètre essentiel de l'ouvrabilité du béton et de ses performances : résistance mécanique à la compression, durabilité.

Les granulats

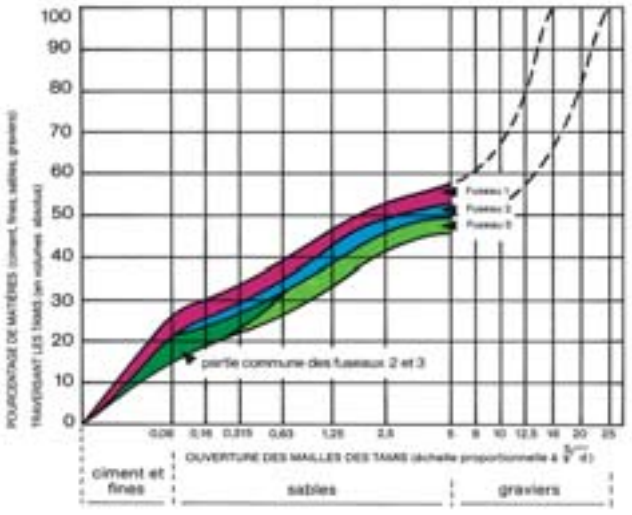
On peut distinguer les granulats naturels (roulés ou concassés) et artificiels (voir le chapitre 2 du tome 1). La gamme des granulats s'est considérablement étendue ; à côté des granulats courants, des granulats spéciaux sont apparus pour des usages spécifiques :
– durs pour des bétons soumis à une forte usure : sols industriels, routes à grande circulation ;
– légers pour isolation thermique et allégement des structures ;
– réfractaires, à faible coefficient de dilatation thermique ;
– de couleur pour les bétons apparents.

Les granulats doivent être des matériaux de qualité et satisfaire notamment deux exigences :
– la propreté, particulièrement importante pour les sables ; la teneur en fines argileuses est strictement limitée ;
– la granulométrie, propriété géométrique essentielle d'un granulat, dont le bon choix est déterminant dans la formulation d'un béton compact.

Les granulats utilisés pour réaliser un béton doivent permettre d'une part de remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et, d'autre part, d'assurer un enrobage correct des armatures.

Au voisinage des parois, il est nécessaire de limiter la taille maximale des grains.

Fuseaux granulométriques



Les adjuvants (norme NF EN 934-2)

Les adjuvants sont de plus en plus utilisés. Ils améliorent les propriétés des bétons – et des mortiers – auxquels ils sont ajoutés (chapitre 2.2, tome 1). Par exemple, l'emploi des plastifiants-réducteurs d'eau et des superplastifiants facilite la mise en place du béton dans les pièces minces fortement armées, ainsi que la réalisation des Bétons à Hautes Performances. Les accélérateurs de prise facilitent le bétonnage par temps froid, tandis que les retardateurs de prise sont utiles pour le bétonnage par temps chaud.

2.1.5 - Propriétés des bétons

Le béton est un matériau facile à mouler quelles que soient les formes de l'ouvrage, à l'épreuve du temps, économique, résistant au feu et nécessitant peu d'entretien. Matériau composite, mis en œuvre de multiples manières, il répond à un grand nombre de spécifications : résistance mécanique, notamment à la compression, isolation thermique et phonique, étanchéité, aspect, durabilité, sécurité incendie.

Pour utiliser au mieux le béton, il faut bien connaître ses propriétés : d'une part à l'état frais, alors qu'il est plastique et qu'on peut le travailler ; d'autre part, à l'état durci, alors que sa forme ne peut plus être modifiée mais que ses caractéristiques continuent à évoluer durant de nombreux mois, voire des années.

Le béton frais

La propriété essentielle du béton frais est son ouvrabilité, qui le rend apte à remplir n'importe quel volume, à condition que sa composition ait été étudiée en conséquence et que les moyens de mise en œuvre soient appropriés. L'ouvrabilité caractérise l'aptitude d'un béton à remplir les coffrages et à enrober convenablement les armatures.

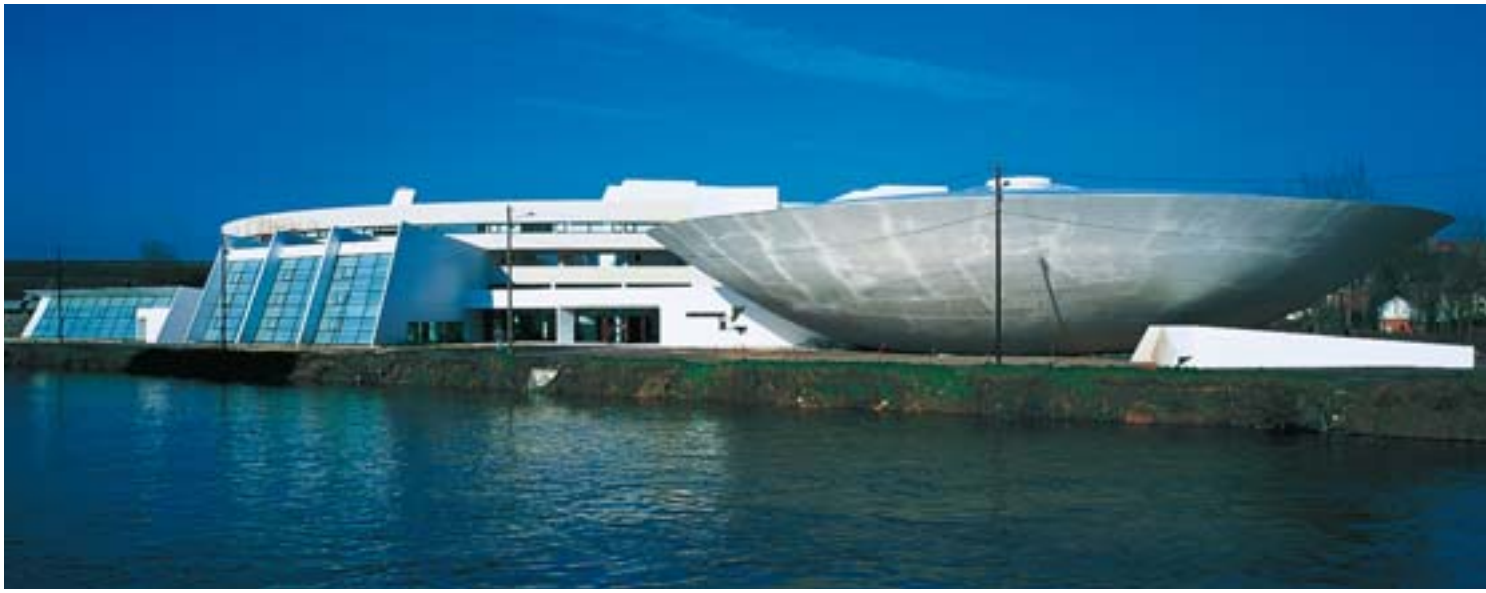
De nombreux facteurs influent sur l'ouvrabilité : type et dosage en ciment, forme des granulats, granulométrie, emploi d'adjuvants et, bien entendu, dosage en eau. Il ne faut cependant pas considérer que le dosage en eau peut être augmenté au-delà d'une certaine valeur dans le seul but d'améliorer l'ouvrabilité. Un excès d'eau se traduit, entre autres inconvénients, par un phénomène de « ressuage », qui est la création à la surface d'une pièce en béton, d'un film d'eau, générateur de fissures après évaporation. Les autres conséquences d'une trop forte teneur en eau sont :

– la diminution de la compacité et, corrélativement, des résistances ;
– une porosité accrue ;
– un risque de ségrégation des constituants du béton ;
– un retrait augmenté ;
– un état de surface défectueux se traduisant notamment par du bullage.

La teneur en eau doit être strictement limitée au minimum compatible avec les exigences d'ouvrabilité et d'hydratation du ciment.

La grandeur qui caractérise l'ouvrabilité est la consistance ; sa mesure peut être effectuée facilement sur chantier avec la méthode du cône d'Abrams ou « slump test », qui est un essai d'affaissement d'un volume de béton de forme tronconique.





La norme NF EN 206-1 définit cinq classes de consistance.

Classement des bétons selon la valeur d'affaissement au cône d'Abrams – norme NF EN 206-1		
Classe	***Consistance du béton***	***Affaissement (en mm) au cône d'Abrams***
S1	Ferme	10 - 40
S2	Plastique	50 - 90
S3	Très plastique	100 - 150
S4	Fluide	160 - 210
S5	Très fluide	≥ 220

Le béton durci

La porosité

Une caractéristique essentielle du béton durci est sa porosité – rapport du volume des vides au volume total. Les études de Féret (début du xx^{e} siècle) avaient déjà établi le lien entre la porosité du béton et sa résistance. L'importance de cette caractéristique sur la résistance du béton aux agents agressifs, sur la carbonatation et sur la tenue au gel a été démontrée depuis. C'est donc un facteur déterminant de la durabilité du béton.

La recherche d'une porosité minimale doit nécessairement passer par :
– l'augmentation de la compacité du béton frais grâce à une bonne composition du béton et à des moyens de mise en œuvre adaptés ; les compacités réellement atteintes sur chantier ne dépassent guère 0,850 : dans 1 m^3 de béton très bien préparé et vibré par des moyens puissants, il existe encore 150 litres d'air ou d'eau, constitués notamment par des canaux extrêmement fins, répartis dans la pâte de ciment durcie (capillaires) ;
– l'augmentation du dosage en ciment et le choix de son type ont une influence favorable sur la diminution de la porosité ; les hydrates formés par l'hydratation du ciment ont un rôle essentiel de colmatage des capillaires.

On améliore la compacité du béton en jouant sur la granulométrie des granulats dans la fraction des éléments fins, et sur la réduction d'eau.

La faible porosité d'un béton présente de nombreux avantages déterminants pour sa durabilité.
• Un béton en contact avec un milieu agressif (eau pure, eaux séléniteuses, eau contenant des acides organiques) subira une attaque beaucoup plus lente si les capillaires du béton sont moins nombreux et plus fins.
• Dans le cas du béton armé, une faible porosité est indispensable, pour protéger les armatures contre les risques de corrosion.

L'acier est en effet protégé contre son oxydation tant qu'il est dans un milieu de pH basique ; or, l'hydratation du ciment produit suffisamment de chaux pour créer ce milieu basique. En revanche, si cette chaux est mise en contact avec le gaz carbonique de l'air, elle se carbonate pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$ de pH acide. La diffusion de l'air dans les capillaires du béton sera d'autant plus lente que le béton présente une faible porosité retardant ainsi sa carbonatation et la protection des armatures contre la corrosion.



Les résistances mécaniques

Une bonne résistance à la compression est la performance bien souvent recherchée pour le béton durci. Cette résistance est généralement caractérisée par la valeur mesurée à vingt-huit jours. On a pu voir précédemment que la résistance dépend d'un certain nombre de paramètres, en particulier le type et le dosage du ciment, la porosité du béton et le facteur E/C, rapport du dosage en eau au dosage en ciment.

Parmi les formules qui permettent de prévoir les résistances, celle de Féret est la plus connue.

$$R = k\left(\frac{C}{C + E + V}\right)^2$$

R = résistance du béton
k = coefficient dépendant de la classe de ciment, du type de granulats et du mode de mise en œuvre
C = dosage en ciment
E = dosage en eau
V = volume d'air subsistant
Cette formule montre l'intérêt que présente la diminution de la quantité d'eau de gâchage et de l'air, ce qui réduit la porosité et par conséquent augmente la résistance.

Les résistances mécaniques du béton sont contrôlées par des essais destructifs ou non destructifs.

• Lors des essais destructifs, la résistance à la compression peut être mesurée en laboratoire sur des éprouvettes généralement cylindriques ; la plus courante en France est l'éprouvette de diamètre 16 cm, hauteur 32 cm ; confectionnées avec le béton destiné à l'ouvrage à contrôler.

• Les essais non destructifs peuvent utiliser le scléromètre, appareil basé sur le rebondissement d'une bille d'acier sur la surface à tester, ou des instruments de mesure de la vitesse du son au travers du béton (4 000 m/s pour un béton courant).





Variations volumiques

Au cours de son évolution, le béton est l'objet de modifications physico-chimiques qui entraînent des variations dimensionnelles.

Le retrait hydraulique avant prise et en cours de prise

Il est dû à un départ rapide d'une partie de l'eau de gâchage, soit par évaporation (rapport élevé surface/volume des pièces, en atmosphère sèche, par temps chaud ou vent violent), soit par absorption (coffrage, granulats poreux). Une surface de béton frais peut évaporer plus d'un litre d'eau par m^2 et par heure. Ce retrait sera limité par une bonne compacité du béton ou par un traitement de cure (film freinant l'évaporation).

Le retrait hydraulique à long terme

Il est dû à un départ lent de l'eau en atmosphère sèche. Il varie suivant les ciments (nature, finesse) et il est proportionnel au dosage en volume absolu de la pâte pure.

Le retrait thermique

Il est dû à des baisses rapides de température provenant :
– soit du ciment lui-même lors de son hydratation aux premiers âges, qui provoque une élévation de température, suivie de son refroidissement ;
– soit des variations climatiques du milieu.

Ces deux causes additionnent parfois leurs effets. Les effets de la première peuvent être réduits en utilisant des ciments à faible chaleur d'hydratation. L'ordre de grandeur du retrait total est de 200 à 300 µm/m pour un béton usuel.

Les déformations sous charge instantanée

Comme tous les autres matériaux, le béton a un comportement élastique linéaire pour des charges modérées de courte durée, c'est-à-dire que ses déformations sont proportionnelles aux charges appliquées.

Le module d'élasticité instantané Ei au jour j d'un béton courant est lié à sa résistance en compression au même âge par une relation empirique telle que :

$$Ei = 11\,000 \sqrt[3]{Rcj} \text{ (en MPa)}$$

(règles BAEL 91).
Rcj = résistance à la compression au jour J (en MPa).

Ei est le plus souvent compris entre 30 000 et 35 000 MPa.

Déformations sous charge de longue durée : le fluage

Au-delà d'une certaine charge (approximativement la moitié de la résistance ultime à la compression), le béton se comporte comme un corps plastique. Après suppression de la charge, il subsiste une déformation résiduelle permanente, c'est ce qu'on appelle le phénomène du fluage.

On admet que cette déformation due au fluage, qui se poursuit durant de nombreux mois (voire années), est de l'ordre de trois fois la déformation instantanée.

(1) $\frac{\Delta l}{l} = \frac{R}{E}$

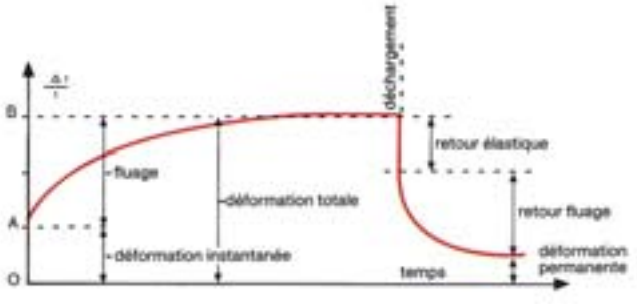


Diagramme de fluage.

2.2 Domaines d'emploi et fonctions du béton



2.2.1 - Les possibilités du béton

Le béton, qu'il soit armé, précontraint ou non, est présent partout où l'on construit, et il doit cette présence à ses nombreuses qualités.

La durabilité : le béton résiste très longtemps aux sollicitations physico-chimiques liées aux conditions d'emploi, aussi bien qu'à l'environnement. On peut, en fait, assigner aux ouvrages en béton la durabilité choisie en fonction de critères technico-économiques retenus.

Ses caractéristiques lui permettent de répondre aux multiples exigences imposées aux ouvrages : sécurité, stabilité statique et dynamique, tenue au feu, inertie thermique, acoustique et bien entendu esthétique. À toutes ces exigences, le béton peut apporter une réponse en jouant sur sa composition et la conception des éléments.

Le béton est un matériau qui sait adapter ses performances selon son utilisation : on pourra développer des hautes résistances mécaniques, ou chercher des gains de poids ou des solutions plus économiques. Le béton peut tantôt satisfaire les plus grandes exigences esthétiques ou tenir un rôle moins apparent, apportant son concours indispensable dans les structures.

Le béton est aussi moulable et donc capable d'épouser toutes les formes, des plus massives aux plus délicates.

2.2.2 - Les domaines d'emploi du béton

Le bâtiment

Le béton tient une place essentielle dans l'urbanisme moderne. Cela semble normal lorsqu'on considère sa participation dans la construction de logements : pour les murs, 80 % des techniques en individuel, plus de 90 % en collectif pour les structures ; pour les planchers le béton est pratiquement le matériau idéal.

Le béton s'est également largement imposé dans les autres secteurs de la construction : bureaux, hôpitaux, locaux scolaires, ainsi que dans les grands édifices publics et les bâtiments industriels.

Les travaux publics

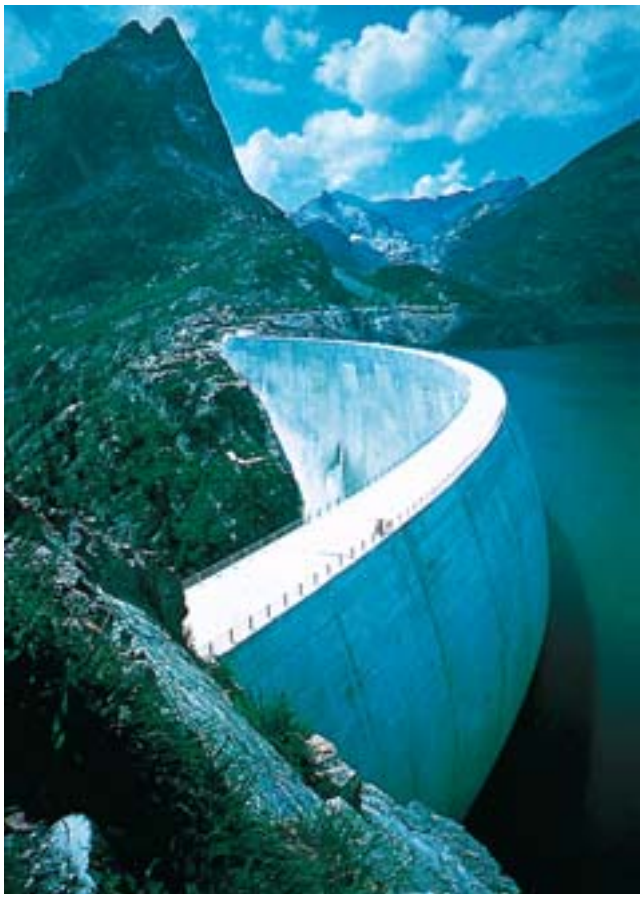
Les ponts
Les progrès techniques, et en particulier l'évolution des caractéristiques du béton, permettent de réaliser des portées atteignant plusieurs centaines de mètres.

Les tunnels
Pour les grands tunnels, dont les exemples se multiplient dans le monde, le béton est soit coulé en place, soit utilisé dans des voussoirs préfabriqués. Ceux-ci sont posés à l'avancement de la machine à forer – le tunnelier.

Les barrages
Les grands barrages sont le plus souvent en béton permettant des implantations dans les sites les plus difficiles.

Les routes
La chaussée béton prend une part de plus en plus importante dans les grandes voiries routières et autoroutières, grâce au développement de techniques modernes : béton armé continu, dalle épaisse, traitement de surface. Les voiries à faible trafic et aménagements urbains montrent un regain d'intérêt pour les solutions béton, qui leur assurent durabilité et faible coût d'entretien.

Autres ouvrages
Il faut également citer les ouvrages hors du commun : structures offshore ou centrales nucléaires, dont les exigences requièrent des bétons aux caractéristiques mécaniques et à la durabilité élevées.







2.2.3 - Le béton et ses fonctions dans le bâtiment

Dans un bâtiment, diverses fonctions sont assurées par le gros œuvre ; on peut les classer en quatre fonctions essentielles :
– fonction structure ;
– fonction plancher ;
– fonction enveloppe ;
– fonction couverture.
Le béton apporte dans ces quatre fonctions une réponse très largement positive à la satisfaction des exigences qu'est en droit d'avoir l'utilisateur.

La fonction structure

La structure, que l'architecte Claude Parent définit comme « l'organisation de la matière destinée à recevoir et à transmettre les efforts », est particulièrement bien assumée par le béton, armé ou précontraint. Outre sa résistance mécanique, sa souplesse d'utilisation autorise la continuité de la forme favorisant la transmission des efforts dans les différents éléments : poteaux, poutres, voiles porteurs, planchers. D'autres exigences indispensables pour cette fonction sont également satisfaites, notamment la durabilité et la tenue au feu, mais aussi l'aspect qui fournit à l'architecte une grande liberté d'expression.

La fonction plancher

Le béton est le matériau quasi exclusif des planchers des constructions modernes en immeubles collectifs comme individuels. Outre ses qualités mécaniques ou de sécurité en cas d'incendie, il apporte par sa masse l'isolation acoustique indispensable entre logements ou bureaux, ainsi qu'un confort dû à son inertie thermique, aussi bien l'hiver que l'été.
Les systèmes de planchers peuvent se ramener à quatre familles :
– les planchers coulés en place (dalles pleines) ;
– le système poutrelles armées ou précontraintes plus entrevous (hourdis) ;
– les prédalles complétées par du béton coulé en œuvre ;
– les dalles finies, alvéolées le plus souvent, de véritables composants qu'il suffit d'assembler sur le chantier.

La fonction enveloppe

Cette fonction est remplie par les murs extérieurs de la construction qui doivent apporter tenue mécanique, étanchéité, isolation thermique et phonique, protection contre l'incendie, et bien entendu aspect esthétique.

Le béton apporte une réponse à cette fonction sous des formes multiples :
– béton banché coulé en place ;
– panneaux préfabriqués à isolation intégrée ou rapportée ;
– éléments maçonnés constitués par des blocs aux caractéristiques variées (blocs creux ou pleins, blocs à bancher, blocs isolants, blocs de parement) ; c'est la formule traditionnelle de la construction individuelle ou du petit collectif.

Les possibilités de finition et de coloration du béton offrent au concepteur un large éventail de parements en béton apparent.

La fonction couverture

Elle peut être assurée dans les immeubles collectifs par une dalle béton sur laquelle est rapportée l'étanchéité et éventuellement un dallage lorsque la dalle doit être circulable ou utilisée en terrasse accessible. Les tuiles en béton teinté dans la masse sont de plus en plus employées. Elles apportent leurs caractéristiques de durabilité, mais aussi leurs aspects variés, permettant de les intégrer aux sites les plus exigeants.

2.2.4 - Des bétons adaptés aux besoins

Les progrès accomplis depuis quelques décennies permettent une très bonne adaptation du béton aux diverses exigences des utilisateurs :
– les ciments offrent une gamme étendue de caractéristiques : résistance, cinétique de prise ;
– les adjuvants permettent d'améliorer la mise en place du béton, sa compacité ou son durcissement ;
– les granulats permettent par leur variété de moduler les propriétés du béton : aspect, poids, dureté de surface, teinte et texture.



Tous les ouvrages réalisés aujourd'hui en béton, armé ou non, bénéficient de bétons formulés pour répondre aux contraintes du chantier, et mis en œuvre grâce à des techniques en évolution constante : vibration, traitements thermiques, traitements de surface. Parmi la diversité de l'offre des bétons utilisés, on peut citer…

Les bétons apparents

Les propriétés architecturales du béton permettent de jouer sur les trois facteurs de l'apparence :
– la teinte est apportée par le choix des composants (ciments, sables, gravillons et éventuellement pigments) ;
– l'aspect résulte de la variété des matériaux et de leur traitement, qui donnent à la surface du béton une texture plus ou moins lisse, des reliefs qui font jouer la lumière ;
– la forme a pu se développer dans toute sa variété grâce à la plasticité du béton et à l'emploi de coffrages ou de matrices qui permettent de mouler le béton au gré de l'imagination du concepteur.

Les bétons légers

L'intérêt des bétons légers réside dans le gain important qu'on peut réaliser sur le poids propre de l'ouvrage. Les bétons légers présentent des masses volumiques qui vont de 800 à 2 000 kg/m^3, contre 2 000 à 2 600 kg/m^3 pour un béton classique. Cette qualité est également recherchée dans les bétons

isolants thermiques, la conductivité variant dans le même sens que la densité. Les bétons légers sont obtenus en jouant sur la composition (bétons caverneux) ou sur l'emploi de matériaux allégés (type argile expansée, polystyrène expansé, liège). On peut également créer des vides par une réaction provoquant un dégagement gazeux ; c'est le cas du béton cellulaire.

Les bétons lourds

À l'inverse, l'emploi de granulats très denses (barytine, magnétite) permet la réalisation de bétons de masse volumique dépassant 3 000 kg/m³. Ces bétons sont utilisés dans la protection contre les radiations ou pour réaliser des culées, des contrepoids, etc.

Les Bétons Hautes Performances (BHP)

Ces nouveaux bétons atteignent des résistances de plus de 100 MPa, grâce à l'emploi de ultra-fines (essentiellement fumées de silice) et de superplastifiants. Leur très forte compacité leur confère une très grande durabilité qui, jointe aux résistances élevées, les privilégie pour les ouvrages très sollicités – à court et à long terme – ou en ambiance agressive.

Les bétons fibrés

Les diverses fibres, dont les caractéristiques sont développées au chapitre 3 sont utilisées dans des domaines variés : pièces minces architectoniques, éléments décoratifs, dallages industriels, bardages, tuyaux et bétons projetés.

Les bétons fibrés à ultra hautes performances (BFUP)

Les bétons fibrés à ultra hautes performances, outre leur durabilité absolue, se distinguent par leur extrême résistance à la compression et leur ductilité. Leurs caractéristiques et leurs performances sont détaillées au chapitre 3.

Les bétons autoplaçants (BAP)

Les BAP se caractérisent par leur hyperfluidité qui permet une mise en place sans recours à la vibration. Ils ont des compositions granulométriques fortement chargées en éléments fins. Des adjuvants de type superplastifiants ou plastifiants réducteur d'eau sont utilisés systématiquement.

2.2.5 - Les deux filières de la réalisation d'un ouvrage en béton

Un ouvrage en béton est soit coulé en place sur le chantier, soit réalisé à partir d'éléments préfabriqués en usine.

Le béton coulé en place

Cette solution, la plus développée (plus de 70 % du béton consommé), a bénéficié ces dernières années d'améliorations des techniques d'élaboration du béton (béton prêt à l'emploi) et de sa mise en œuvre sur chantier : béton pompé, coffrages plus performants, plus sûrs et mieux adaptés aux besoins – banches, tables, coffrages tunnels, coffrages glissants. La qualité du béton s'en trouve améliorée, ainsi que sa finition.

Le bétonnage sur chantier est prépondérant :
– pour les ouvrages de volume important, impossibles à réaliser par d'autres moyens : fondations, poutres de forte section, massifs ;
– pour les ouvrages courants dont la réalisation sur chantier est d'un moindre coût (murs banchés, dalles pleines, poteaux) ou d'ouvrages comportant peu d'éléments répétitifs ;
– pour les liaisons et la solidarisation en bétons de produits préfabriqués.



Le béton préfabriqué

Cette industrie relativement récente a vu son développement se préciser au cours des vingt dernières années au travers d'une spécificité axée sur deux domaines :

– des composants standardisés ne nécessitant pas de moyens de manutention trop lourds : blocs, poutrelles, tuiles, pavés, tuyaux, éléments de voiries ;
– des éléments en béton apparent dont la finition et la qualité exigées par le maître d'œuvre ne sont que très difficilement réalisables sur chantier.

Cette spécialisation, allant dans le sens de la qualité, a permis à ces produits d'être plus compétitifs dans un marché concurrentiel.

2.2.6 - Le béton et la qualité

Le matériau béton, par les contrôles de qualité effectués à tous les stades de son élaboration, est un atout important.

La qualité des constituants

Les ciments font l'objet de normes (pour les plus courants, norme NF EN 197-1) et bénéficient de la marque de qualité CE + NF. Les granulats et les adjuvants font également l'objet de normes de définitions et de spécifications (chapitres 2.1 et 2.2 tome 1).

La qualité du béton ou des éléments préfabriqués

Le BPE et les usines produisant des éléments préfabriqués soit font l'objet d'une certification de la centrale ou de l'usine, soit produisent des matériaux eux-mêmes assujettis à des marques de qualité. Les contrôles effectués et leur suivi par un organisme certificateur sont autant de garanties pour l'utilisateur.

Le plan qualité sur le chantier

Les entreprises mettent en place sur les chantiers, des plans qualité qui impliquent l'emploi de matériaux conformes aux normes et leur mise en œuvre conformément aux textes officiels.

2.3 Formulation des bétons courants

2.3.1 - Objet

Le béton est un mélange dont la composition a une profonde influence sur ses caractéristiques ; mais si les caractéristiques attendues sont la plupart du temps bien définies, la mise au point d'un béton approprié peut s'avérer plus délicate. Les paramètres sont en effet nombreux :

– les données du projet : caractéristiques mécaniques, dimensions de l'ouvrage, ferraillage…
– les données du chantier : matériel de mise en œuvre, conditions climatiques…
– les données liées aux propriétés du béton : maniabilité, compacité, durabilité, aspect…

On mesure donc l'importance de l'étude de la formulation du béton, d'autant plus nécessaire que les caractéristiques requises sont élevées.

2.3.2 - Rappel des caractéristiques recherchées pour un béton

Les caractéristiques détaillées dans le chapitre 2.1 peuvent être rappelées.

À l'état frais

La maniabilité, propriété du béton caractérisée par des mesures de consistance, est indispensable pour permettre la mise en œuvre du béton dans les moules ou les coffrages, dont les formes sont parfois complexes.

Dans le béton armé, elle doit permettre d'assurer la compacité du béton dans l'ouvrage, et le bon enrobage des armatures. Il ne faut pas perdre de vue que la maniabilité doit être adaptée aux moyens de mise en œuvre sur chantier : un béton de consistance très ferme nécessite des moyens de vibration appropriés.



Pour le béton durci

• La porosité (pourcentage de vides rapporté au volume total) conditionne les caractéristiques mécaniques et la durabilité du béton.
• La résistance mécanique est un critère souvent déterminant, surtout la résistance à la compression.
• La durabilité est liée à la résistance aux agressions physico-chimiques du milieu environnant (milieu humide, milieu marin, effet du gel, pollution atmosphérique, etc.) et aux sollicitations mécaniques de l'ouvrage.

2.3.3 - Comment déterminer la composition du béton ?

L'obtention des caractéristiques requises pour le béton passe impérativement par l'adoption et l'optimisation de sa formulation aux exigences appropriées à l'ouvrage et à son environnement. C'est la

raison pour laquelle la démarche retenue comporte le plus souvent deux phases.

• Approche d'une composition, soit de façon graphique à partir de méthodes telles que celle de Faury ou de Dreux, soit de façon expérimentale (par exemple à partir de la méthode LCPC de Baron et Lesage). Il faut préciser que ces différentes méthodes sont basées sur la recherche d'une compacité maximale conformément aux théories de Caquot sur la composition granulaire des mélanges, que les connaissances actuelles sur le béton ont confirmées pour l'essentiel.

• La deuxième phase consiste à ajuster expérimentalement cette formulation en fonction des résultats obtenus par des essais effectués en laboratoire (essais d'étude) ou dans les conditions du chantier (épreuves de convenance).

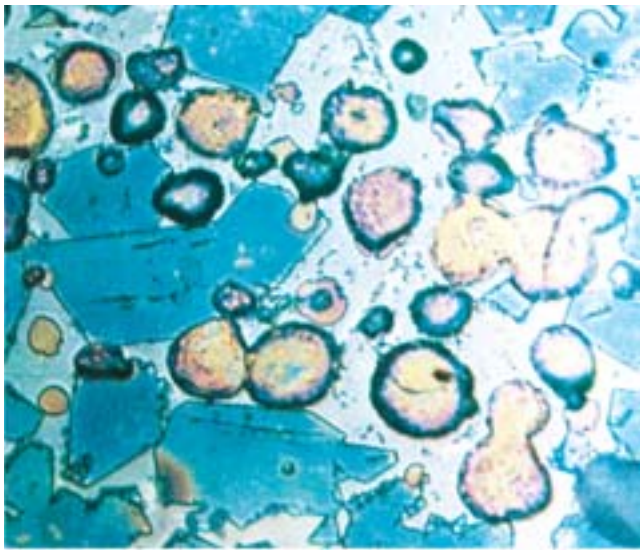
2.3.4 - L'approche de la formulation

Dosage en ciment

Pour bien comprendre le caractère primordial du dosage en ciment, il faut rappeler que celui-ci remplit deux fonctions essentielles dans le béton.

La fonction de liant

Elle est déterminante dans la résistance du béton, qui dépend de la nature du ciment, de sa propre résistance et de l'évolution de son durcissement.



La fonction filler

Le ciment complète la courbe granulométrique du béton dans les éléments fins. Il faut noter que le développement dans le temps des hydrates du ciment colmate progressivement les capillaires, contribue à diminuer la porosité d'ensemble du béton et améliore notablement sa durabilité.

Les abaques de G. Dreux, exposées au paragraphe suivant, reposent sur cette approche qui privilégie la « fonction liant », donc la résistance. Dans cette démarche, le ratio C/E (dosage en ciment sur dosage en eau) est calculé à partir de la formule :

$$Rb\ 28 = G\ Rc\ (C/E - 0{,}5)$$

expression simplifiée inspirée de la formule de Féret.
Rb 28 = résistance à la compression du béton à 28 jours.
Rc = résistance réelle du ciment.
G = coefficient compris entre 0,35 et 0,65.

Il faut cependant rappeler que la « fonction filler » conduit à un dosage en ciment supérieur aux valeurs habituellement fixées par les cahiers des charges ou les documents normatifs. La norme NF EN 206-1 fixe des dosages minimaux en ciment C liés aux classes d'exposition du béton (G10 tome 1).

Par exemple, pour un béton armé courant de résistance caractéristique 25 à 30 MPa, en classe d'exposition au gel XF, le dosage minimal en ciment varie, selon que le gel est susceptible d'être modéré ou plus sévère (classe XF1 ou XF2).

Dosage en eau

Le dosage en eau est un facteur très important de la composition du béton. On pressent bien l'influence qu'il a sur la porosité du béton par les vides créés, lorsque l'eau s'élimine pour différentes raisons (évaporation, combinaison chimique, absorption par les granulats).

Par exemple, avec un E/C, couramment utilisé, de 0,55, on estime que la moitié de l'eau de gâchage sert à l'hydratation du ciment, l'autre moitié est une eau de mouillage interstitielle qui contribue à la plasticité du béton requise pour sa mise en œuvre. Ce schéma est modifié par l'emploi croissant d'adjuvants contribuant à améliorer la plasticité sans nécessiter une présence d'eau en excès, nuisible aux caractéristiques finales du béton durci.

Toutes ces raisons soulignent l'importance de l'optimisation du dosage en eau, qu'on a tendance à approcher, par exemple en le déduisant de l'expression C/E précédemment adoptée et en l'affinant grâce à des essais pratiqués dans les conditions du chantier, qui ont le mérite d'intégrer des paramètres difficiles à quantifier.

Choix des granulats

Une fois déterminée la dimension maximale des granulats compatible avec les exigences géométriques précédemment déterminées de l'ouvrage (espacement des armatures entre lesquelles doit pouvoir passer le béton, épaisseur d'enrobage, forme de la pièce à mouler), on doit résoudre les deux problèmes suivants.

Choix des classes granulaires

La plupart du temps, la composition d'un béton présente une courbe granulaire discontinue obtenue à partir de deux classes granulaires : un sable de type 0/4 et un gravillon 5,6/12,5 ; 5,6/16 ou 5,6/20, par exemple. On peut également utiliser deux classes de gravillons dans des compositions plus élaborées, lorsqu'on cherche à se rapprocher d'une granulométrie continue. Pour répondre à des performances particulières, il existe des bétons spéciaux qui font appel à davantage de classes.

Choix des granulats

Deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton :

– la proportion relative gravillons/sable traduite par le facteur G/S que les études récentes ont fait apparaître comme moins importante qu'on ne le pensait auparavant, dans la mesure où ce facteur reste inférieur à 2 ;
– la granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse (chapitre 2.1, tome 1). Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8.

Choix et dosage des adjuvants

Selon la propriété recherchée pour le béton, on aura recours à l'adjuvant approprié : accélérateur de prise, plastifiant, entraîneur d'air… (chapitre 2.2, tome 1). Compte tenu de la diversité des produits disponibles, on se conformera aux prescriptions du fabricant pour leur emploi et leur dosage, et on vérifiera leur compatibilité avec le ciment.

2.3.5 - Une méthode pratique de composition : les abaques de G. Dreux

Les abaques de G. Dreux, présentés dans l'ouvrage de l'auteur : *Nouveau guide du Béton*, permettent une approche à la fois pédagogique et pratique d'une composition de béton répondant à des objectifs déterminés, moyennant quelques hypothèses facilitant la démarche. Il est bien évident qu'une fois déterminée cette composition, elle devra, ainsi qu'il a été souligné, être soumise à l'expérimentation afin d'affiner les dosages indiqués.

Les données retenues

En général, les données suivantes sont déterminées par le cahier des charges du projet, les conditions du chantier ou la disponibilité des matériaux.

La résistance à la compression du béton

Le domaine d'application des abaques est celui des bétons courants présentant une résistance à 28 jours, comprise entre 15 MPa et 40 MPa.

La maniabilité du béton

En fonction des caractéristiques de l'ouvrage et des moyens du chantier, on fixe pour le béton une maniabilité caractérisée par sa consistance et mesurée par l'essai au cône d'Abrams.

Classe de consistance des bétons – norme NF EN 206-1	
Consistance des bétons	**Affaissement (en mm) au cône d'Abrams**
S1	10 - 40
S2	50 - 90
S3	100 - 150
S4	160 - 210
S5	≥ 220

Granulats choisis

Pour l'établissement des abaques, trois classes granulaires ont été retenues :
– un sable 0/4 ;
– deux gravillons 5,6/12,5 et 5,6/20.
Le ciment choisi est de classe 32,5 selon les hypothèses de la théorie de G. Dreux.



Éprouvettes après essai de rupture en compression.

Considérations pratiques sur les abaques

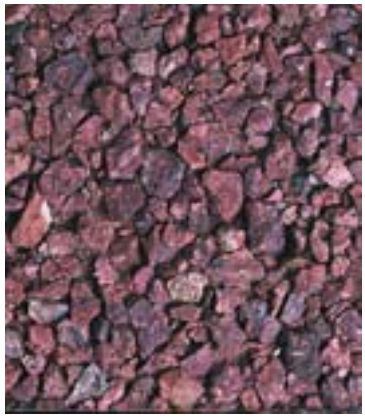
Compte tenu des conditions de chantier les plus courantes, certaines hypothèses pratiques ont été retenues. Les quantités de granulats sont exprimées en volume, ce qui est suffisant pour la plupart des bétons courants.

Pour tenir compte de l'apport d'eau dû au degré d'humidité des granulats, les abaques introduisent un correctif défini dans le tableau ci-dessous.

Ces indications ne restent qu'approximatives, et seule une mesure d'affaissement au cône est susceptible de préciser le dosage en eau à adopter.

Les abaques donnent une indication sur la réduction d'eau procurée par l'emploi d'un adjuvant de type plastifiant réducteur d'eau, mais il est évident que la valeur réelle de réduction d'eau sera à déterminer selon l'adjuvant utilisé et son dosage.







Degrés d'humidité des granulats					
		Sec	**Humide**	**Mouillé**	**Trempé**
Aspect		Mat Un peu poussiéreux	Brillant Légère adhérence sur la main	Très humide Dépôt d'eau sur la main	L'eau ruisselle sur les granulats qui sont saturés
% d'eau	Sables	0 à 3 %	4 à 7 %	8 à 11 %	12 à 15 %
	Gravillons	1 %	3 %	5 %	6 %

UTILISATION DES ABAQUES DE DREUX

GRANULOMÉTRIES ADOPTÉES POUR LES GRANULATS

↓

CHOIX DE L'ABAQUE APPROPRIÉ

↓

Caractéristiques à atteindre pour le béton

- Résistance à la compression
- Consistance du béton

Informations fournies par les abaques

- Dosage en ciment
- Dosage en sable
- Dosage en gravillons
- Dosage en eau totale

Données résultant de mesures

- Degré d'humidité des granulats
- Dosage en adjuvant

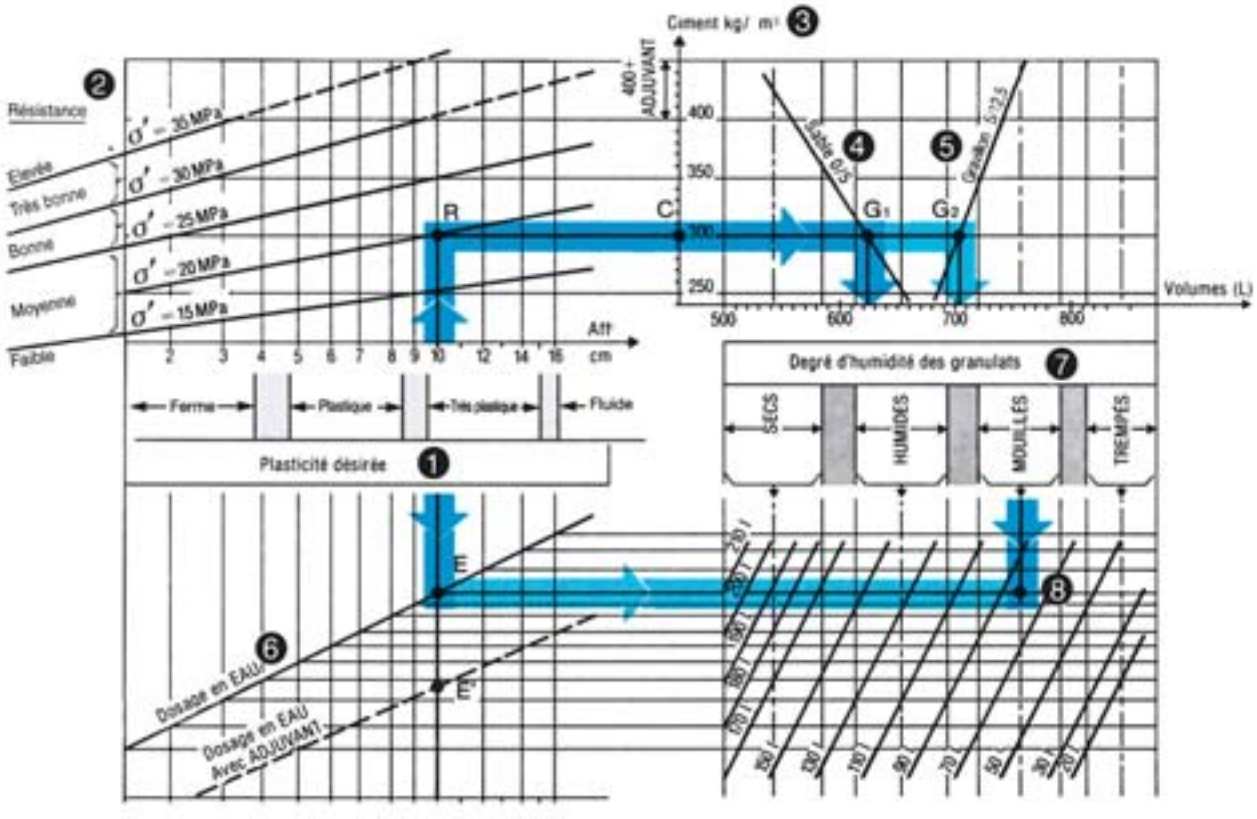
→ Eau à introduire au malaxage

CAS D'UN BÉTON FIN = 12,5 mm.

Abaque n° 1.

On désire :

1. un béton très plastique (affaissement 10 cm)
2. une résistance moyenne : 20 MPa (environ)
3. ciment (classe 32,5) 300 kg/m³
4. sable 0/4 mm à l'état sec 625 litres
5. gravillons 5,6/12,5 mm 705 litres
6. dosage en eau – point E
7. on suppose que les granulats sont « mouillés »
8. la lecture sur la grille donne 80 litres d'eau environ à ajouter.





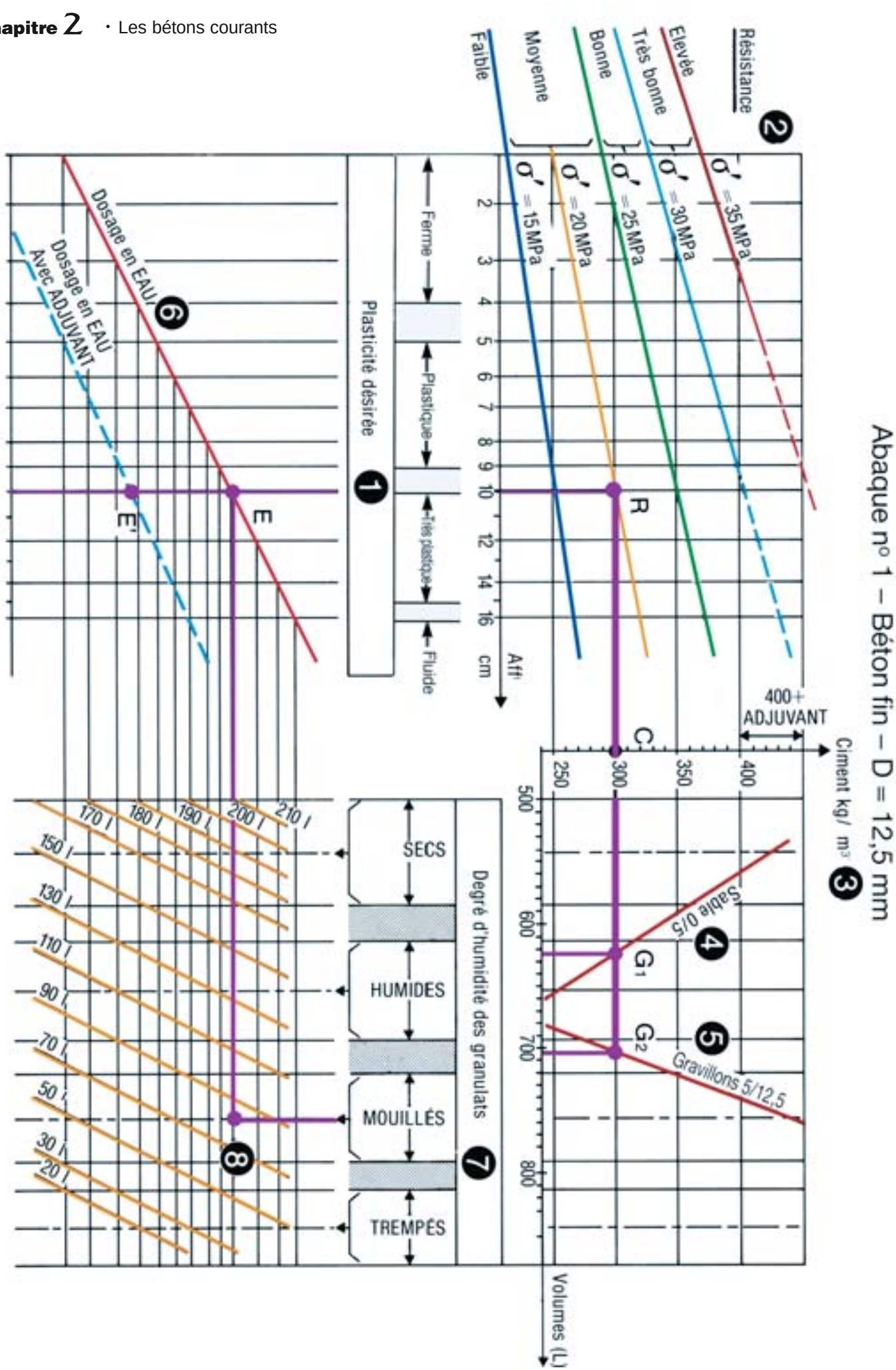
2.3.6 - Exemples pratiques de composition

Les exemples suivants résultent de l'application des abaques de Dreux, pour des bétons de chantier armés ou non destinés à divers ouvrages courants sans exigences particulières. La plage de résistances en compression à 28 jours va de 15 à 40 MPa.

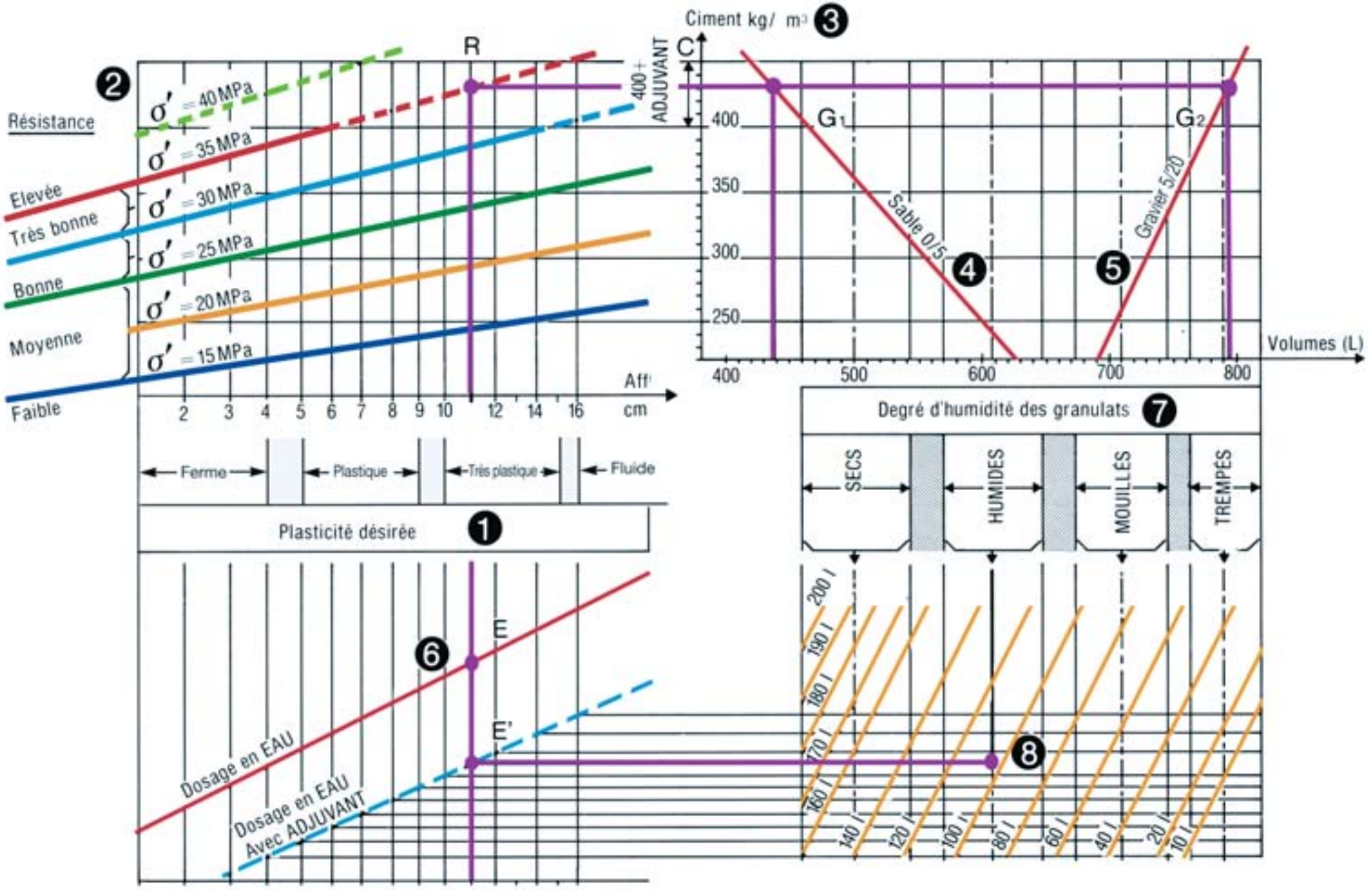
La consistance recherchée a été prise dans tous les cas de type plastique (affaissement au cône 7 cm). Les granulats sont considérés comme secs ou très faiblement humides. Le ciment est de classe 32,5. Il faut remarquer que, du fait des hypothèses retenues pour l'établissement des abaques, le dosage en eau (pour un abaque donné) est seulement dépendant de la plasticité. Cette approche, qui risque d'être insuffisante dans bien des cas, nécessitera le plus souvent une confirmation par des essais dont l'importance a déjà été soulignée.

Il faut enfin noter que la plage de résistances couverte par les abaques n'excède pas 30 à 45 MPa, domaine des bétons les plus courants. L'extrapolation au-delà de ces limites conduit notamment à des dosages en ciment qui semblent peu conformes à la pratique.

Les valeurs de dosages de ciment obtenues à partir des abaques doivent être comparées aux dosages minima spécifiés par la norme NF EN 206-1.


Abaque n° 1 – Béton fin – D = 12,5 mm
Résistance
Elevée
Très bonne
Bonne
Moyenne
Faible
σ' = 35 MPa
σ' = 30 MPa
σ' = 25 MPa
σ' = 20 MPa
σ' = 15 MPa
2
Ferme
Plastique
Très plastique
Fluide
Plasticité désirée
1
Affaissement cm
2 3 4 5 6 7 8 9 10 12 14 16
R
C
400 + ADJUVANT
250 300 350 400
Ciment kg/ m³
3
Sable 0/5
4
G1
G2
5
Gravillons 5/12,5
500 600 700 800
Volumes (L)
Dosage en EAU
Dosage en EAU Avec ADJUVANT
6
E
E'
170 l 180 l 190 l 200 l 210 l
150 l 130 l 110 l 90 l 70 l 50 l 30 l 20 l
8
SECS
HUMIDES
MOUILLÉS
TREMPÉS
Degré d'humidité des granulats
7

Abaque n°2 - Béton courant - D - 20 mm



2.4 Le béton prêt à l'emploi – BPE

2.4.1 - L'origine et le développement du BPE

L'appellation « Béton Prêt à l'Emploi » (BPE) est réservée au béton préparé en usine dans des installations fixes (centrales) et transporté jusqu'au lieu d'utilisation dans des camions malaxeurs (bétonnières portées), ou dans des camions bennes pour certains bétons fermes.

Les premières centrales de BPE sont apparues au début du siècle aux États-Unis et en Allemagne, seulement en 1933 en France. Il fallut en fait attendre 1963 pour assister au début de l'essor du BPE en France (24 centrales), plus de dix ans après l'Allemagne et l'Angleterre dont l'expérience a été largement mise à profit.

Le tableau suivant montre le fort développement de cette industrie entre 1965 et 1975 avec une part croissante du pourcentage de ciment consommé en France : 34,5 millions de m³ de béton en 2002, utilisant 47 % du ciment. On est cependant encore loin des taux de pénétration observés aux USA, au Japon et au Canada, qui dépassent 60 %.

Évolution de l'industrie du BPE de 1963 à 2002

Année	Production en millions de m³	% de ciment consommé par le BPE
1963	0,6	2,8
1965	2,3	5,0
1970	14,0	15,2
1974	25,9	25,9
1980	25,9	25,9
1984	21,0	27,0
1988	30,6	36,0
1992	30,5	39,7
2000	34,5	47,0
2002	34,5	47,0
2003	34,8	47,0
2004	37,6	49,0
2005	39,7	51,0

Le nombre d'entreprises de BPE est passé de 18 en 1963 à près de 600 aujourd'hui. Aujourd'hui, le BPE offre 1 700 centrales réparties sur tout le territoire, permettant de disposer presque toujours d'une centrale dans un rayon maximum de moins d'une heure de route de tout chantier en France.

2.4.2 - Les avantages du BPE

Parmi les avantages apportés par la fabrication du béton en centrale BPE il faut souligner…

Les avantages techniques

En fonction des exigences du chantier, le BPE peut mettre au point et livrer les bétons les mieux adaptés, dont les caractéristiques font l'objet d'un suivi grâce à des contrôles de laboratoire, qui permettent de s'assurer également de la conformité des constituants.

L'automatisation très poussée des centrales et la précision des dosages contribuent à la régularité et à la qualité des produits livrés. Les centrales disposent d'une large gamme de produits : bétons autoplaçants, bétons légers, bétons colorés, etc.

Les avantages sociaux

Le BPE évite les manutentions pénibles nécessaires au chargement des bétonnières de chantier.



Les avantages économiques

Le BPE évite le gaspillage et l'immobilisation de stocks sur le chantier, réduisant les investissements en matériel et en hommes. Par la ponctualité des livraisons et grâce aux délais courts, la productivité des chantiers se trouve améliorée.

La simplification de l'organisation du chantier

Les manutentions de constituants sont supprimées ; les variations de cadences de bétonnage sont mieux absorbées grâce à la souplesse des livraisons du béton. L'emprise des chantiers sur la voirie est réduite.

Les services

La livraison est faite par camions adaptés, pour des quantités correspondant strictement aux besoins. Des pompes ou des camions équipés de tapis permettent de faciliter la mise en place du béton.

2.4.3 - Une fabrication industrielle

La production industrielle du BPE est un facteur de qualité des produits ; à tous les stades de la fabrication, les équipements sont conçus pour assurer une production automatisée, fiable et rigoureuse.

La réception et le stockage

Une centrale utilise généralement deux ou trois types de ciments stockés dans des silos de grande capacité. Les granulats (sables et gravillons) sont stockés par catégorie pour éviter tout mélange. Les adjuvants sont stockés en cuves pour un dosage précis.

Le dosage

C'est un poste clé, conçu pour une fabrication automatique à partir de compositions programmées du béton. Le dosage pondéral des granulats et du ciment atteint une précision de l'ordre de 2 à 3 %. Après détermination de la teneur en eau des granulats et des matières en suspension dans le cas d'utilisation d'eau de recyclage grâce à des sondes électroniques, le dosage de l'eau d'appoint est effectué de manière également pondérale.

Le malaxage

Le malaxage des constituants dans des malaxeurs à poste fixe est une garantie de régularité des bétons. Les malaxeurs sont généralement à axe vertical, ce qui assure un brassage efficace des constituants ; la gâchée est déversée directement dans les camions de livraison.

Le poste de commande

Les centrales sont commandées depuis un poste qui est le cerveau de la fabrication, de façon :
– soit automatique (cas le plus général aujourd'hui) : l'opérateur sélectionne la composition programmée dans la mémoire de l'ordinateur et inscrit le volume à fabriquer ; les dosages et le malaxage se font alors automatiquement ;
– soit semi-automatique : le dosage des constituants est affiché par l'opérateur ; le cycle de fabrication se déroule alors automatiquement.

Le laboratoire et les contrôles

Le laboratoire
Le laboratoire permet d'effectuer les essais sur les matières premières et sur les bétons à l'état frais ou durci. C'est la garantie du suivi des fabrications pour l'utilisateur ; les résultats des contrôles usuels peuvent être fournis aux clients. En outre, des contrôles supplémentaires, ou des essais pour une étude préalable de béton, peuvent être effectués à la demande.

La marque NF
En France, la certification NF-Béton prêt à l'emploi de conformité aux normes, est matérialisée par la marque NF délivrée par Afnor Certification ; cette marque apporte la garantie :
– que le producteur met en place un système d'assurance qualité et vérifie par des essais sur les constituants et sur les bétons le respect des caractéristiques normalisées ;
– que le système d'assurance qualité du producteur ainsi que son autocontrôle sont vérifiés.
La profession du béton prêt à l'emploi a résolument choisi de s'inscrire dans une logique de certification. Ainsi, en 2006, plus de 1 050 centrales BPE sont elles certifiées NF.



Le BPE et le développement durable

Moins étendues que les cimenteries, les centrales de Béton Prêt à l'Emploi n'en sont pas moins soumises aux mêmes contraintes. Ces installations sont de plus en plus souvent installées dans des hangars afin de limiter les nuisances sonores pour le voisinage et améliorer l'insertion dans le paysage, objectif qui motive parfois la plantation d'arbres.

Sur le plan de la maîtrise des rejets, les centrales de béton BPE s'inscrivent pleinement dans une logique « **zéro déchet** ». Les excédents de béton frais sont récupérés pour en extraire les granulats qui, après lavage, pourront resservir ultérieurement, de même que les eaux chargées en laitance, recueillies et réinjectées dans le circuit de fabrication comme apport de fines.

Sur le plan énergétique, l'atout du béton est son mode de **fabrication à froid**, par simple mélange des constituants de base. Cela se traduit par une consommation électrique limitée et l'absence d'émissions directes de gaz à effet de serre ou de tout autre composé portant potentiellement atteinte à la santé et à l'environnement.

Ce tableau serait incomplet si l'on omettait de souligner l'excellente couverture du territoire français par les centrales BPE. Grâce à la **densité de ce maillage**, l'impact du transport est limité. Le ciment est acheminé en priorité par **voie fluviale ou ferroviaire**, et le béton prêt à l'emploi est disponible en tout point à moins d'une heure de route. Cette présence au plus près des besoins se



double d'un recours privilégié à une **main d'œuvre locale** et constitue l'une des composantes de la **contribution sociale** de l'industrie du béton.

Pour quantifier ces éléments, le SNBPE a décidé de mener une étude afin de renseigner une Fiche de Déclaration environnementale et sanitaire (FDES) du béton au format fourni par l'AIMCC selon la norme française NF P 01-010. Ce travail se base sur des données environnementales quantifiées concernant le produit étudié, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à l'élimination du produit, ainsi que sur les données sanitaires fournies par le SNBPE. L'unité fonctionnelle considérée pour l'étude, en partant d'un BPS XF1 C25/30 CEMII, est d'assurer la fonction de mur porteur (structure et clos) pour un bâtiment de type R+4 ou plus sur 1 m² de paroi, d'épaisseur 15 cm, pendant une annuité, tout en assurant une isolation acoustique (49 dB additive à celle d'un doublage) et une isolation thermique (Résistance thermique de 0,1 W/°C additive à celle d'un doublage). Le produit est mis en œuvre selon les règles de l'art.



2.4.4 - L'offre BPE

Désignation des bétons :
Il existe trois types de produits dans la norme NF EN 206-1 :
– les Bétons à Propriétés Spécifiées – BPS ;
– les Bétons à Composition Prescrite – BCP ;
– les Bétons à Composition Prescrite dans une Norme – BCPN.

Les constituants des bétons doivent être conformes aux normes qui les concernent ; le ciment doit être certifié CE + NF.

Les BPS

Il s'agit de béton pour lequel les propriétés requises et les caractéristiques supplémentaires sont spécifiées au producteur qui est responsable de fournir un béton satisfaisant à ces exigences. Les spécifications de base sont les suivantes.

• La conformité à la norme NF EN 206-1

• La classe d'exposition
La prise en compte des actions dues à l'environnement de l'ouvrage est un critère majeur qui donne lieu à la définition de classes d'exposition du béton détaillées dans le tableau de la page 62.

• La classe de résistance à la compression (détail des classes dans le tome 1, chapitre 3.2.8). Le tableau NA.F.1 fournit la classe de résistance minimale devant être spécifiée en fonction de la classe d'exposition. Le prescripteur reste libre de spécifier une classe de résistance plus élevée en fonction des caractéristiques et des contraintes de l'ouvrage.

• La classe de consistance.

Classes de consistance du béton selon la mesure la plus usuelle d'affaissement au cône d'Abrams

Classe	S1	S2	S3	S4	S5
Affaissement (en mm)	10 à 40	50 à 90	100 à 150	160 à 210	≥ 220

• La classe de chlorure spécifiant la teneur maximale en ions chlore rapportée à la masse de ciment.

• La dimension maximale des granulats.

Le client peut également, après accord avec le fournisseur, spécifier des caractères complémentaires tels que la nature et la provenance des constituants, ou toute spécification relative aux propriétés à l'état frais (pompabilité, etc.).

Les BPS sont les bétons traditionnellement fabriqués et commercialisés par les centrales de BPE.

La désignation du béton comporte successivement le type de béton (BPS), la référence à la norme NF EN 206-1 et les valeurs prescrites pour les cinq critères énoncés ci-dessus.

Exemple de BPS :

Corrosion induite par la seule carbonatation en ambiance sèche ↓ — *Consistance affaissement au cône d'Abrams : 100 à 150 mm* ↓ — *Dimension des granulats < 22,4 mm* ↓

NF EN 206-1 – XC1 – C25/30 – S3 – Cl 0,40 – 22,4

↑ *Résistances caractéristiques minimales f_{cR} à 28 jours sur cylindre et sur cube* — ↑ *Teneur maximale en ions chlorure : < à 0,40 %*

Classes d'exposition des bétons selon la norme NF EN 206-1			
Classe d'exposition		***Description de l'environnement***	***Béton concerné***
XO		Aucun risque de corrosion ou d'attaque	Béton non armé ou béton armé en environnement très sec
XC		Corrosion induite par carbonatation	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées exposé à l'air et à l'humidité
	XC1	Sec ou humide en permanence	
	XC2	Humide, rarement sec	
	XC3	Humidité modérée	
	XC4	Alternance d'humidité et de séchage	
XD		Corrosion induite par les chlorures ayant une origine autre que marine	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact d'une eau ayant une origine autre que marine contenant des chlorures, y compris des sels de déverglaçage
	XD1	Humidité modérée	
	XD2	Humide, rarement sec	
	XD3	Alternance d'humidité et de séchage	
XS		Corrosion induite par les chlorures présents dans l'eau de mer	Béton contenant des armatures ou des pièces métalliques noyées soumis au contact des chlorures présents dans l'eau de mer ou à l'action de l'air véhiculant du sel marin
	XS1	Exposé à l'air véhiculant du sel marin, mais pas en contact direct avec l'eau de mer	
	XS2	Immergé en permanence	
	XS3	Zone de marnage, zone soumise à des projections ou à des embruns	
XF		Attaque gel/dégel avec ou sans agent de déverglaçage	Béton soumis à une attaque significative due à des cycles gel/dégel alors qu'il est mouillé
	XF1	Saturation modérée en eau sans agent de déverglaçage	
	XF2	Saturation modérée en eau avec agent de déverglaçage	
	XF3	Forte saturation en eau sans agent de déverglaçage	
	XF4	Forte saturation en eau avec agent de déverglaçage	
XA		Attaques chimiques	Béton exposé aux attaques chimiques se produisant dans les sols naturels, les eaux de surface et/ou les eaux souterraines
	XA1	Environnement à faible agressivité chimique	
	XA2	Environnement d'agressivité chimique modérée	
	XA3	Environnement à forte agressivité chimique	

Les BCP

Il s'agit de béton pour lequel la composition et les constituants à utiliser sont spécifiés au producteur par le prescripteur. Le prescripteur a la responsabilité de s'assurer que les prescriptions sont conformes aux exigences de la norme NF EN 206-1 et que la composition prescrite est capable d'atteindre les performances attendues pour le béton. Le producteur est responsable de fournir un béton respectant cette composition prescrite. Les contrôles sur les performances atteintes ne sont pas de la responsabilité du producteur (ils incombent au prescripteur ou à l'utilisateur).

Les BCP dans une norme

Ce type de béton est réservé à certains ouvrages simples de bâtiment, ce sont généralement les bétons fabriqués à la bétonnière sur le chantier. En France, la norme NF P 18-201 (DTU 21) définit des bétons à composition prescrite destinés à des ouvrages simples (catégorie A du DTU 21 : R+2 comportant au plus un seul niveau de sous-sol).



Ces bétons sont au maximum de la classe de résistance C16/20, pouvant être portée à C20/25 en cas de contrôle de la production.

Pour tous les produits BPS et BCP, des adjuvants conformes à la norme NF EN 934-2 peuvent être utilisés.

Les produits du BPE

En fonction des besoins particuliers du chantier, des bétons aux propriétés particulières peuvent être fabriqués et livrés.

Bétons retardés

Ces bétons permettent des cadences de bétonnage faibles ou scindées en phases.

Bétons autoplaçants

Ces bétons présentent une exceptionnelle facilité de mise en œuvre. En effet, il s'agit d'un matériau se mettant en œuvre sans faire appel à la vibration ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel de chantier.

Bétons colorés

Ces bétons, colorés dans la masse par des pigments minéraux permettent de réaliser des bétons d'aménagements particulièrement esthétiques.

Bétons fibrés

Pour certains travaux particuliers, les fibres métalliques confèrent au béton une résistance améliorée en traction, ainsi qu'aux chocs. Les bétons avec fibres synthétiques offrent une bonne résistance à la fissuration de surface.

Les bétons routiers

Le développement des chaussées béton et de leurs équipements (séparateurs, bordures et caniveaux coulés en place) a conduit à étudier des formulations de béton appropriées.

Les exigences de ces bétons (consistance, résistance mécanique, résistance au gel et aux sels de déverglaçage) ont amené les producteurs de BPE et les entrepreneurs de chaussées en béton à signer un protocole d'accord précisant notamment les engagements réciproques pour les spécifications des bétons.

Les bétons routiers sont utilisés dans la réalisation des voies à grande circulation, ainsi que de nombreuses voiries à faible trafic (voiries urbaines, de lotissement, forestières ou agricoles).



2.4.5 - Le transport et la manutention

Pour les travaux routiers, le béton peut être transporté dans des bennes, mais le matériel le plus utilisé est la bétonnière portée (toupie) dont la capacité varie entre 4 et 10 m³, et dont la rotation assure un malaxage continu favorable à la bonne homogénéité du béton.

Les ajouts d'eau sont interdits pendant le transport et au déchargement. De même, à part le superplastifiant, généralement ajouté juste avant déchargement, les autres adjuvants ne doivent pas être incorporés en fin de transport.

Le béton doit être protégé contre les risques d'évaporation, de délavage ou de ségrégation. Le délai de transport ne doit pas dépasser 1 h 30 (sauf

EXEMPLE DE BON DE LIVRAISON

SUPERMIX 2, rue du Roi 75000 PARIS Tél. : 01.60.80.53.12 Fax : 01.60.80.53.55	Centrale de :	Charenton	
	Bon n° :	3605	
	Camion n° :	725	
	Volume (m3) :	6	
	Date :	4/01/05	

Heures (1)	
1ère gâchée	7 h 00
Arrivée chantier :	
convenue	7 h 30
réelle	7 h 25
Début déchargement	7 h 35
Fin déchargement	8 h 00

Client : MPL
Chantier : 16, rue de la Révolution 94400 VITRY-sur- SEINE
Référence commande :

Désignation	Certification ou Attestation	Classe d'exposition (2)	Classe chlorures	Résistance caractéristique (3)	Type et classe du ciment	Type Additions	Dosage (4) (C+kA) kg/m3	Consistance	Dmax	Type adjuvant
BPS NF EN 206-1	NF	XF1 (F)	0,4	C25/30	CEMI 52,5 N	V		S4	20	PRE
OU										
BCP NF EN 206-1	NF				CEMII/A-L 42,5R PM-CP1		350		20	
OU										
Produit spécial (5) ou référence à une autre norme de produit										

Appellation commerciale		Conseils de sécurité: En aucun cas nos produits ne doivent entrer en contact avec la peau ou les muqueuses au risque de provoquer des allergies, des rougeurs ou des brûlures.	xi:irritant
Propriétés particulières spécifiées			
Livraison réceptionnée, le client (Signature)	Ajout sur chantier (6) Type et quantité : Demandeur : Signature:		

(1) Sauf dispositions particulières, le béton doit être mis en œuvre, au plus tard, 2 heures après la fabrication de la première gâchée.
(2) La classe X0 ne peut convenir que pour des bétons ne subissant aucune agression, non armés ou faiblement armés avec un enrobage d'au moins 5 cm.
(3) Indiquer le mode de contrôle du béton (cylindres ou cubes)
(4) Dosage minimal, si spécifié par le client, en BPS et dosage nominal en BCP.
(5) L'appellation PRODUIT SPECIAL ne peut être utilisée pour des bétons entrant dans le domaine d'application de la norme NF EN 206-1.
(6) Tout ajout sur chantier non prévu dans la formulation du béton rend le béton non conforme à la norme NF EN 206-1.

Les cases grisées doivent être remplies si spécifié à la commande



traitement spécial), délai ramené à 45 minutes par temps, chaud, où le risque de chute de maniabilité est accru. L'emploi de retardateurs de prise ou de plastifiants permet généralement de s'opposer à ce type de difficultés.

Le déchargement du béton sur le chantier se fait par une goulotte, après inversion du sens de rotation de la bétonnière. Des tubes emboîtés permettent de prolonger le rayon d'action de la goulotte jusqu'à 4 à 5 m en contrebas. Au-delà, des tapis transporteurs équipent souvent les camions et permettent de décharger le béton jusqu'à 10 m du camion et sur des hauteurs de 5 à 6 m.

Pour des chantiers d'une certaine importance, d'accès difficile, un camion pompe permet de livrer le béton à des distances dépassant 150 m, et sur des hauteurs de 100 m et plus, pour les pompes les plus puissantes.

2.4.6 - Les organismes professionnels du BPE

Le Syndicat National du Béton Prêt à l'Emploi (SNBPE), 3, rue Alfred Roll, 75017 Paris, regroupe plus de 80 % de l'activité de la profession. Les informations sur les produits peuvent être également obtenues auprès des 19 Syndicats régionaux dont les adresses sont disponibles au SNBPE (site internet : www.snbpe.org). Des informations plus spécifiques sont disponibles au Syndicat National du Pompage du Béton (SNPB), 3, rue Alfred Roll, 75017 Paris.

2.5 Les bétons : fabrication et transport

2.5.1 - La fabrication du béton

Avant d'aborder la fabrication du béton, il n'est pas inutile de rappeler qu'il s'agit d'un matériau obtenu en mélangeant un ensemble de constituants présentant des états et des caractéristiques très différents :
– un liant : le ciment, poudre d'une très grande finesse ;
– des granulats de forme et de densité variées ;
– un liquide : l'eau de gâchage ;
– éventuellement des adjuvants soit liquides, soit en poudre.
L'air qui se trouve enfermé dans le béton frais lors de sa fabrication, joue un rôle non seulement sur sa plasticité, mais également sur ses déformations et ses propriétés finales.



Centrale BPE.

Un matériau homogène

Pour élaborer un béton, matériau homogène, il faut tenir compte au cours des phases de fabrication et de transport, de l'homogénéité de ses constituants. Il faut aussi réaliser un mélange efficace, qui ne puisse pas subir ensuite de ségrégation ou de décohésion.

Parmi les facteurs influant sur l'homogénéité du mélange béton, on peut notamment souligner :
– la régularité de chaque constituant : les données retenues pour fixer les paramètres de dosage ou de mélange ne doivent pas être remises en cause par d'éventuelles variations de ceux-ci ;
– la détermination d'une composition de béton tenant compte de sa destination et des constituants utilisés : type et classe de ciment, nature et granularité des granulats, adjuvants ;
– la teneur en eau ;
– le type de matériel utilisé pour le malaxage ;
– le temps de malaxage ;
– les conditions et temps de transport du béton entre sa fabrication et sa mise en œuvre.

La fabrication

Les méthodes de fabrication du béton sont adaptées à la nature du chantier et aux types de béton à réaliser. Le béton est fabriqué principalement dans des centrales de BPE, dans des centrales de chantier, dans des bétonnières pour les petits chantiers.

2.5.2 - L'approvisionnement et le stockage des constituants

Le choix des constituants qui vont être utilisés pour réaliser un béton déterminé repose sur deux exigences principales : l'une, d'ordre technique, dépend des caractéristiques visées (résistance, granulométrie, coloration, etc.) ; l'autre, d'ordre économique, tient compte en particulier de la proximité des fournisseurs par rapport au chantier, des coûts compétitifs…

Approvisionnés par route, rail ou voie d'eau, les constituants du béton doivent faire l'objet d'un stoc-

kage compatible avec les besoins du chantier, en évitant aussi bien les ruptures de stock que les surstockages. Les constituants utilisés doivent toujours être de qualité et conformes aux normes en vigueur.

Le stockage du ciment

Une fois qu'ont été choisis le ciment adapté à l'ouvrage à réaliser (CEM I, CEM II…), sa classe de résistance (32,5, 42,5, 52,5) et éventuellement sa résistance à certains milieux – travaux à la mer, en eaux à haute teneur en sulfates (voir G10 et G11), on veillera à son stockage soigné sur le chantier.

Pour les petits chantiers, le ciment conditionné en sacs doit être stocké sur des palettes disposées sur un sol plat et sec. Les sacs seront protégés de la pluie, mais également des remontées d'humidité du sol, des projections de boue et de tout choc mécanique susceptible de les déchirer. Si plusieurs types de ciment sont nécessaires au chantier, leur stockage sera séparé pour éviter erreurs et mélange.

Pour les grands chantiers, le ciment livré en vrac par camion-citerne est déchargé pneumatiquement et stocké dans des silos verticaux de forme cylindrique d'une capacité supérieure à 30 tonnes.

Le stockage des granulats

Il convient d'éviter tout mélange entre des granulats de natures, d'origines ou de classes granulaires différentes. Pour éviter la pollution des granulats par de la terre ou des déchets, le stockage se fait sur une aire aménagée. La propreté des sables, notamment, est un facteur de qualité indispensable du béton. Elle peut être mesurée par un essai décrit dans le G10.

L'aire de réception des granulats doit permettre un écoulement correct des eaux. Celui-ci est souvent obtenu grâce à la réalisation d'une aire bétonnée, légèrement inclinée. Cette aire comprend parfois, surtout pour les périodes froides, des canalisations de distribution de vapeur, pour assurer le réchauffage des granulats.

Le stockage en silos ou trémies est plus rarement utilisé. Ce mode de stockage permet de grandes réserves de matériaux et de gros débits. Les silos peuvent comporter plusieurs compartiments permettant le stockage de différents granulats. Leur capacité peut être supérieure à 150 m³. Les trémies sont à ciel ouvert, généralement de faible hauteur et aussi hautes que larges.

Le stockage en silo ou en trémie présente les garanties de qualité et de régularité indispensables pour l'obtention de bétons à caractéristiques très régulières (résistances mécaniques, teinte). C'est également le seul moyen susceptible de garantir une teneur en eau constante des granulats, qui fait l'objet de mesures par sonde.

Le stockage de l'eau

Si l'on est amené à stocker de l'eau sur le chantier, on veillera à ce qu'elle ne puisse être polluée par des matières organiques ou des sels tels que les chlorures ou les sulfates.

Le stockage des adjuvants

Les adjuvants sont stockés en bidons ou en containers fermés, bien identifiés. Les précautions concernant le stockage par temps froid, ainsi que les dates limites d'emploi doivent être scrupuleusement respectées.

2.5.3 - Le dosage des constituants

Le ciment est acheminé du silo à la trémie de dosage par des vis sans fin (vis d'Archimède) qui assurent un débit régulier et à l'abri de l'humidité ambiante, ou par transport pneumatique.

Le dosage pondéral (nettement préférable au dosage en volume) est soit mécanique – la trémie emplie de ciment, portée par un fléau analogue à une balance romaine déclenche l'arrêt de l'arrivée de ciment lorsque le poids requis est atteint –, soit électronique – le fléau classique est remplacé par un barreau dont la déformation est mesurée par une jauge de contrainte.

En ce qui concerne les granulats, ils sont repris par skip ou dragline et acheminés jusqu'à la doseuse par bande ou tapis. Pour obtenir une composition de béton définie et constante, la teneur en eau des granulats doit être mesurée régulièrement. Le dosage en eau de gâchage sera effectué, déduction





faite de l'apport d'eau contenue dans les granulats. L'eau est dosée par compteur volumétrique ou pompe doseuse.

2.5.4 - Le malaxage des constituants

Le malaxage est une phase importante de la fabrication du béton, car il va conditionner la qualité de son homogénéité. Pour assurer la réussite de cette opération, il faut choisir un matériel adapté et déterminer un temps de malaxage suffisant.

Le matériel de malaxage

Le choix d'un appareil (bétonnière ou malaxeur) dépend de sa capacité de production, de son aptitude à malaxer différents types de mélanges (secs, plastiques, etc.) pour donner des bétons réguliers.

Les bétonnières

Ce sont des appareils qui assurent le mélange des constituants par simple rotation de la cuve suivant un axe qui peut être horizontal ou légèrement incliné. Des palettes solidaires de la cuve assurent l'entraînement des matériaux qui retombent par gravité. Ce mouvement de brassage assure le mélange des constituants.

Les bétonnières sont simples, robustes et plus particulièrement adaptées aux petits débits de production. La capacité de la cuve varie de 50 à 100 litres pour les plus petites, pour atteindre 1 m^3 et plus pour les grosses bétonnières à axe horizontal. La vidange de la cuve se fait par basculement, ou par inversion du sens de rotation. Les bétons fabriqués à la bétonnière sont au maximum de la classe de résistance C16/20, pouvant être portée à C20/25 en cas de contrôle de la production.

Les malaxeurs

Ces appareils assurent une homogénéité du mélange supérieure à celle obtenue avec les bétonnières, grâce au déplacement relatif des composants à l'intérieur du mélange. Ce déplacement est provoqué par des trains de palettes ou de planétaires dont l'axe est excentré par rapport à celui de la cuve, qui est elle-même fixe ou tournante.

La plupart des malaxeurs sont à axes verticaux. Le béton subit un puissant effet de brassage à la fois dans le sens vertical et dans le sens horizontal. Ce type de matériel est le mieux adapté à l'obtention de bétons homogènes.

Les paramètres du malaxage

Une fois déterminé l'appareil adapté au béton à réaliser, le malaxage, pour être efficace, doit prendre en compte certains paramètres :
– l'ordre d'introduction des composants ;
– la vitesse de rotation de la cuve ;
– le temps de malaxage.

L'ordre d'introduction idéal est parfois difficile à réaliser du fait du remplissage discontinu de la cuve par skip ou chargeur, qui ne facilite pas une introduction simultanée et progressive des constituants. Avec un malaxeur, on considère comme préférable, lorsque c'est possible, d'introduire le ciment et l'eau qui assure son mouillage, puis le sable – pour constituer le mortier – et enfin les gravillons. Les adjuvants ont été préalablement dilués dans une partie de l'eau de gâchage. Avec une bétonnière, l'introduction d'une partie des gravillons avec une partie d'eau assure le lavage de la cuve. Le ciment, le reste de l'eau et le sable sont introduits ensuite. Les gravillons restants sont introduits en dernier.

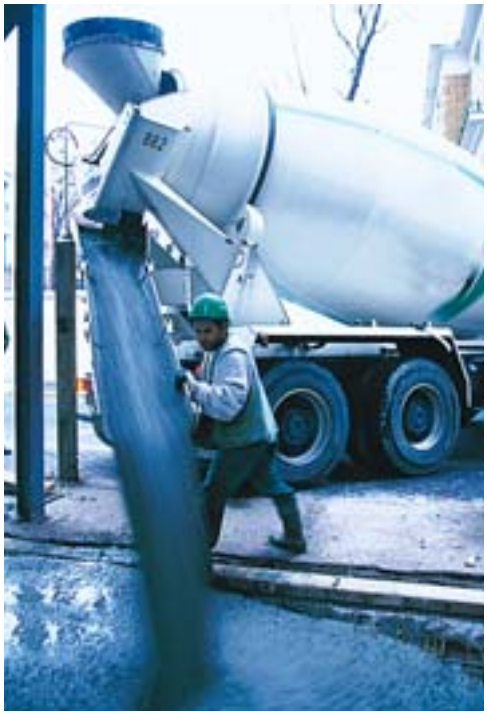
La vitesse de rotation des appareils est de l'ordre de 20 à 30 tours/mn, et diminue avec le diamètre de la cuve. Elle ne dépasse pas 20 tours/mn pour les bétonnières.

Le temps de malaxage est de l'ordre de 45 secondes. En revanche, les bétons très fermes ou riches en éléments fins peuvent nécessiter des durées de malaxage plus longues : 1 à 2 minutes.

2.5.5 - Le transport du béton : l'approvisionnement du chantier

Le transport du béton frais jusqu'au lieu de coulage fait appel à des matériels très différents, selon qu'il s'agit de parcourir de courtes distances sur un chantier ou qu'il doit être acheminé depuis une centrale de fabrication, parfois éloignée de plusieurs kilomètres. Ce deuxième cas, qui concerne plus particulièrement l'industrie du béton prêt à l'emploi est développé dans le chapitre 2.4 qui lui est consacrée.

Mentionnons simplement l'emploi de camions à bennes fixes ou des classiques bétonnières portées



(toupies) qui assurent le maintien de l'homogénéité pendant le transport. La capacité de ces bétonnières portées varie de 4 à 10 m³. Le temps cumulé de transport et de déchargement doit être limité à 1 h 30 min environ dans des conditions normales de température (voisines de 20 °C). Le risque rencontré est une chute de la maniabilité du béton. L'emploi de retardateurs de prise et de plastifiants permet de résoudre ce type de difficultés.

2.5.6 - Le transport du béton par benne, goulotte, tapis

Sur le chantier même, le matériel le plus utilisé pour le transport du béton est la benne à béton, dont la forme et les dimensions sont très variables. Elle est remplie par le haut, et vidée en partie basse par ouverture mécanique ou pneumatique d'une trappe. La commande d'ouverture peut être faite à distance. La partie inférieure de la benne est souvent munie d'un manchon qui permet de diriger la coulée de béton et de limiter la hauteur de chute, génératrice de phénomènes de ségrégation. La benne est acheminée au droit des coffrages par chargeur, grue et même hélicoptère dans les cas difficiles. Le béton peut être également transporté par goulotte ou par tapis.

2.5.7 - Le transport du béton par pompage

Le pompage du béton est une technique qui se développe rapidement car il permet une importante productivité, la limitation du temps d'attente avant la mise en place du béton, la possibilité d'assurer l'approvisionnement sur des sites difficiles d'accès, la mise en place de quantités importantes en une seule coulée.

La technique se développe parallèlement à la croissance du BPE. Le camion-pompe équipé de flèches allant jusqu'à 60 m, peut envoyer le béton directement de la toupie au lieu de coulage. L'évolution rapide des bétons pompés permet ainsi d'atteindre des longueurs de transport de 300 à 400 m, jusqu'à 100 m et plus en hauteur avec des bétons particulièrement adaptés.

Le parc Français est estimé à environ 1 200 machines.

Le procédé de pompage

Le béton est préalablement « agité » dans la trémie de réception de la pompe dès sa sortie du camion malaxeur. Le cheminement du béton dans la tuyauterie, se fait grâce à un cycle aspiration / poussée, à l'aide de deux pistons reliés à deux vérins hydrauliques évoluant à l'intérieur de deux cylindres appelés « chemises » (le premier vérin remonte dans sa chemise : aspiration du béton, simultanément, le second vérin descend : poussée du béton). Le nombre de cycles par minute « aspiration / poussée », permet de définir la cadence de pompage en mètres cubes par heure.

> ***Nota***
> *Le débit courant des pompes varie entre 20 et 150 m³ par heure.*

Les types de pompes à béton

• Pompe automotrice à flèche : elle peut être installée à l'intérieur ou à l'extérieur du chantier ; par définition dépendante des conditions du chantier, elle doit être en permanence en bon état de fonctionnement et disposer de tous les équipements de sécurités. À côté de la pompe automotrice « traditionnelle », les techniques de pompage conduisent actuellement en France au développement :
– des malaxeurs pompes pour les petits chantiers ou les interventions de faible volume ;
– des tapis pour le même type d'intervention suivant les habitudes de mises en œuvre des entreprises.

• Pompe stationnaire plus tuyauterie et mât de bétonnage : elle reste à demeure sur le chantier.

2.5.8 - Les règles à respecter lors du transport

Le matériel utilisé pour le transport du béton devra être fréquemment nettoyé à l'eau pour ne pas introduire des corps étrangers ou des déchets dans le béton. Par ailleurs, le matériel sera tel que la hauteur de chute du béton lors du coulage, ou les chocs mécaniques durant la manutention, ne soient pas de nature à créer des problèmes de ségrégation dans le béton.

La durée de transport du béton doit être limitée en fonction des conditions ambiantes de température, d'hygrométrie ou de vent. Elle ne peut dépasser 1 h 30.

Le béton fabriqué sur le chantier doit être mis en œuvre moins de 30 minutes après sa fabrication.

2.6 Mise en œuvre du béton sur chantier

2.6.1 - Les différentes phases de la mise en œuvre

De la sortie de la bétonnière ou du malaxeur à l'ouvrage fini, le béton passe par différentes phases : transport, coulage dans un coffrage ou un moule, serrage, maturation, démoulage, cure. Ces différentes phases impliquent le recours à des techniques qui ont beaucoup évolué et qui doivent respecter des règles d'exécution, décrites dans les documents techniques tels que des normes, ou des fascicules de documentation à caractère normatif de l'Afnor.

Les règles de bonne exécution, objet de cette notice, concernent la mise en œuvre sur le chantier et ne s'appliquent pas nécessairement à la fabrication en usine. Des critères spécifiques peuvent dans ce cas être imposés par la nature des pièces, le processus de préfabrication ou les conditions de travail en usine.

2.6.2 - L'approvisionnement du béton

Les différentes filières d'approvisionnement du béton jusqu'au site de coulage font l'objet du chapitre 2.4. Il faut cependant rappeler les conditions à respecter pour ne pas modifier les caractéristiques du béton entre son lieu de fabrication et son lieu d'utilisation.

• Éviter les chocs ou manœuvres brutales qui peuvent provoquer la séparation des constituants du béton : phénomène de ségrégation dû aux densités différentes des constituants.

• Veiller à ce que le temps de transport ou d'attente ne soit pas susceptible d'entraîner une perte d'ouvrabilité, voire un début de prise du béton, surtout par temps chaud (l'emploi d'un retardateur de prise permet de compenser ce phénomène).

• À l'inverse, par temps froid, il convient de prendre des précautions pour protéger le béton contre le gel.



· Le matériel utilisé pour le transport doit être fréquemment nettoyé pour éviter tout risque de pollution (déchets végétaux ou organiques, restes de béton…).

Les essais de contrôle des caractéristiques du béton effectués au point de livraison doivent avoir lieu juste avant son coulage ; les essais *in situ*, permettent d'approcher au maximum les caractéristiques du béton fabriqué, avec celles de l'ouvrage.

2.6.3 - La mise en place

La préparation des différents éléments

La préparation des coffrages (voir le chapitre 2.8)

Les coffrages doivent :
– être suffisamment rigides pour supporter la poussée du béton tout particulièrement dans le cas des bétons fluides, sans se déformer y compris pendant la phase de vibration, et stables ;
– être étanches pour éviter les fuites de laitance aux joints ;
– avoir un parement nettoyé et traité avec un agent de démoulage approprié et appliqué en couche régulière ; cette préparation est indispensable pour l'obtention d'un béton apparent régulier, et pour éviter des phénomènes d'adhérence entraînant des arrachements lors du décoffrage ;
– être exempts de corps étrangers (clous, ligatures, boulons, etc.) et d'eau stagnante.

La préparation des armatures

Pour éviter leur déplacement pendant la mise en place du béton et sa vibration, les armatures doivent être correctement calées et positionnées (il existe de nombreux modèles de cales s'adaptant aux différents diamètres d'armatures et aux formes de la pièce à réaliser). L'enrobage des armatures doit aussi être contrôlé.

Les surfaces de reprise de bétonnage

Leur emplacement sera prévu lors du calepinage pour correspondre à la jonction des éléments constitutifs, de façon à ne pas créer un joint gênant pour l'aspect du parement de béton.

Les surfaces de reprise doivent être rugueuses (un repiquage peut parfois s'avérer nécessaire) pour faciliter l'adhérence et humidifiées lorsqu'il s'agit d'un béton déjà durci.

Le déversement du béton

Les dalles, planchers, chaussées

Le béton doit être déversé d'une hauteur inférieure à 0,8 mètre et être réparti régulièrement. Les accumulations locales entraînent une surcharge sur les étaiements, ainsi que des risques de ségrégation.

Les éléments coffrés

En plus des précautions précédentes, il peut être nécessaire d'utiliser des manchons ou des tubes, pour limiter la hauteur de chute libre du béton (à l'origine de phénomènes de ségrégation), surtout dans des coffrages hauts et profonds. Il faut éviter le ruissellement du béton sur les parois du coffrage ou le phénomène de cascade sur les armatures.



Le tube plongeur, le manchon ou la goulotte doivent permettre de déverser le béton au fond du coffrage. Ils sont remontés progressivement au fur et à mesure du bétonnage.

Les précautions à prendre lors du coulage sont les suivantes :
– limiter la hauteur de chute ;
– prévoir des couches horizontales successives n'excédant pas 60 à 80 cm de hauteur ;
– maintenir une vitesse de bétonnage aussi constante que possible ;
– éviter la mise en place lors de trop fortes pluies pouvant entraîner un lavage des gros granulats et un excès d'eau dans le béton, surtout à sa surface.



2.6.4 - Le serrage du béton

Son objet

Le serrage est indispensable pour obtenir des bétons présentant de bonnes caractéristiques mécaniques et physiques, durables, avec des parements réussis. Sauf dans le cas de béton autoplaçant, il est indispensable de faciliter la mise en place du béton grâce à des moyens de serrage.

Le serrage a pour objet de faciliter l'arrangement optimal des grains, permettant ainsi l'écoulement du béton, un bon remplissage des cavités et l'enrobage correct des armatures. Le serrage permet aussi d'évacuer une grande partie de l'air contenu dans le béton et d'améliorer ainsi sa compacité.

Les moyens de serrage (voir le chapitre 2.9)

Les différents modes de serrage s'appliquent aux ouvrages verticaux (murs, voiles, poteaux, etc.) aussi bien qu'aux horizontaux (dalles, chaussées, etc.).

La vibration interne

On utilise des aiguilles vibrantes électriques, pneumatiques ou thermiques, de 25 à 150 mm de diamètre, en fonction du volume du béton à vibrer. Pour les bétons courants de granulométrie inférieure à 25 mm, les aiguilles employées ont un diamètre de 40 à 100 mm.

Les règles suivantes doivent être respectées :
– immerger l'aiguille verticalement ou sous un angle faible ;
– la remonter lentement (10 à 15 secondes) sur une hauteur n'excédant pas 60 cm.
– choisir des points de vibration successifs compris entre 30 et 60 cm selon le diamètre de l'aiguille (distance entre points successifs 8 à 10 fois le diamètre de l'aiguille) ;
– ne pas vibrer trop près du coffrage et ne pas toucher les armatures avec l'aiguille.

La vibration externe par vibrateurs de coffrage

Pour les ouvrages de faible épaisseur ou, à l'inverse, de hauteur importante avec une forte densité d'armatures, la vibration interne est pratiquement impossible, on utilise des vibrateurs fixés sur les coffrages. Il s'agit de moteurs à balourds, plus délicats à manipuler que les aiguilles et dont l'emplacement n'est pas toujours facile à déterminer. L'épaisseur intéressée par les vibrateurs n'excède pas 20 à 30 cm. Pour des pièces importantes, les vibrateurs doivent être déplacés sur les coffrages au fur et à mesure de l'avancement du bétonnage.

Nota
La vibration externe sur chantier est une opération qui nécessite une certaine expérience. Elle est par contre couramment utilisée en préfabrication, car les moules, plus robustes, permettent une transmission homogène et efficace des vibrations. Le caractère répétitif des éléments à réaliser permet la détermination optimale de l'emplacement des vibrateurs.

La vibration externe par règle vibrante

Cette technique est utilisée pour les dalles ou chaussées en béton de 20 à 25 cm d'épaisseur ; elle consiste à déplacer à la surface du béton une règle (ou une poutre) équipée de vibrateurs, qui assure son serrage à partir de sa surface.

2.6.5 - La mise en œuvre du béton sans vibration : les bétons autoplaçants

Ces bétons se mettent en place sous le seul effet de la gravité. Ils permettent un gain économique sur la productivité, le matériel et la main-d'œuvre ; ils améliorent les aspects de parement et suppriment les nuisances sonores causées par les vibrateurs. Ces bétons sont appelés à se développer très largement dans les prochaines années.

2.6.6 - Le surfaçage du béton

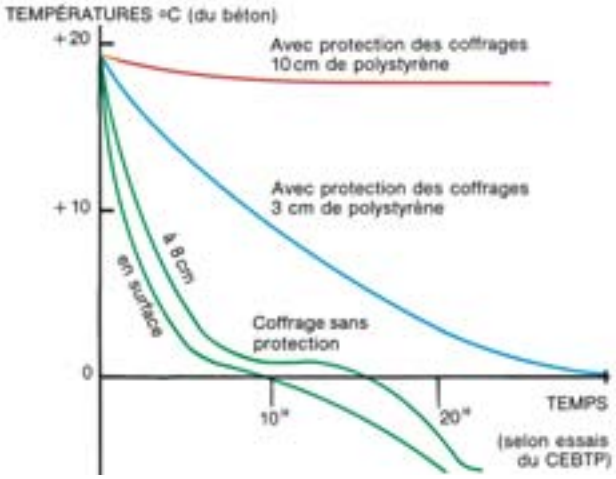
Le surfaçage du béton frais est destiné à fermer sa surface, c'est-à-dire à augmenter la compacité de la zone de la peau. L'objectif recherché est aussi un fini de surface lisse et une bonne planéité.

Pour que le surfaçage soit efficace, le béton doit être suffisamment riche en mortier et sans excès d'eau qui aurait tendance à ressuer exagérément en surface, entraînant un phénomène de microfissuration (faïençage). Le surfaçage est réalisé avec divers matériels : taloches manuelles ou mécaniques, lisseuses rotatives.

Le surfaçage peut être complété par d'autres traitements qui donnent à la surface du béton des caractéristiques particulières. Ces traitements sont notamment le striage, le rainurage ou le dénudage des granulats.

2.6.7 - La protection du béton

La protection permet d'éviter une prévention contre :
– un lessivage par les eaux de pluie et les eaux de ruissellement ;
– un refroidissement trop rapide pendant les premiers jours suivant la mise en place ;
– des différences importantes de températures internes ;
– une basse température ou le gel ;
– des vibrations ou des chocs pouvant disloquer le béton ou nuire à l'adhérence avec les armatures.
Les parties coffrées sont naturellement protégées par les coffrages.



Exemple d'évolution de la température du béton selon la protection assurée par le coffrage :
– température extérieure – 7 °C ;
– coffrage métallique ordinaire ou isolé par du polystyrène.

La résistance thermique du coffrage peut en outre remplir une double fonction :
– limiter les gradients thermiques entre le cœur et la peau de l'ouvrage ;
– retarder, par temps froid, le refroidissement du béton, ce qui permet de lui assurer un durcissement suffisant avant d'être exposé aux effets du gel.

La protection peut également concerner les effets du froid pour les parties non coffrées ; il s'agit alors de créer une barrière thermique par bâche isolante, voire chauffante.



2.6.8 - Le décoffrage

La résistance mécanique et l'homogénéité de la teinte

Le décoffrage d'un ouvrage ne doit intervenir qu'en fonction de la satisfaction de deux exigences principales.

La résistance mécanique du béton : sauf cas particuliers (coffrages glissants, traitements thermiques du béton, etc.), on ne décoffre pas, en règle générale, un béton présentant une résistance à la compression inférieure à environ 8 MPa. Cette exigence est évidemment sensiblement augmentée pour des pièces soumises à des sollicitations (contraintes de flexion, chocs…).

La recherche de l'homogénéité de la teinte peut entraîner des variations des temps de coffrage, en fonction des variations climatiques.





Les paramètres influant sur les délais de décoffrage

– les conditions ambiantes ;
– les caractéristiques de l'ouvrage (dimension, contraintes imposées) ;
– les propriétés du béton à l'état frais (composition, évolution de son durcissement) ;
– la nature du ciment et son dosage ;
– la nature du coffrage et ses caractéristiques.

Les moyens de contrôle

Ils sont destinés à contrôler les caractéristiques requises du béton :
– essais d'information sur éprouvettes conservées dans les mêmes conditions que l'ouvrage ;
– essais non destructifs divers, en particulier le scléromètre ou la mesure de la vitesse du son ;
– la maturométrie.

2.6.9 - La cure du béton

La cure du béton est la protection apportée pour éviter sa dessiccation et lui assurer une maturation satisfaisante. Elle est particulièrement indispensable pour les dalles et les chaussées, surtout lorsque les conditions atmosphériques sont défavorables : vent, soleil, hygrométrie faible, etc.

Les procédés de cure

Ce sont des moyens simples tels que l'humidification renouvelée de la surface ou la mise en place d'une bâche plastique (polyane), ou la pulvérisation de produits de cure qui constituent un film imperméable à la surface du béton.



La durée de cure

La durée de la cure dépend essentiellement des conditions ambiantes et de l'évolution du durcissement du béton. Elle est réalisée :

– pour les dallages, à la fin du surfaçage, soit par la pulvérisation d'un produit de cure, soit par la mise en place d'un film de polyéthylène translucide ou d'un géotextile régulièrement humidifié ;
– pour les murs en élévation, après le décoffrage, par pulvérisation d'un produit de cure, ou par la mise en place d'un géotextile régulièrement humidifié.

2.7 Le bétonnage – par temps chaud – par temps froid

2.7.1 - Le bétonnage par temps chaud

Les conditions climatiques lors de la mise en œuvre ont une grande influence sur la qualité finale du béton. Il convient de se préoccuper de cette sensibilité aux températures élevées dès la préparation du béton, puis, pendant son transport, sa mise en œuvre, son durcissement et sa cure jusqu'à maturité.

En règle générale, dès que la température mesurée sur chantier est durablement supérieure à 25 °C, des dispositions sont à prendre dans le programme de bétonnage, elles sont plus contraignantes encore, au-dessus de 35 °C. Ce premier sous-chapitre traite essentiellement des conséquences et préconisations du bétonnage par temps chaud.

Conséquences d'une augmentation de la température sur les bétons

Le béton est sensible aux paramètres que sont la température, l'hygrométrie, la vitesse du vent, qui agissent sur :
– la rhéologie du béton et son évolution ;
– la vitesse de prise ;
– la cinétique de durcissement ;
– l'évaporation et la dessiccation du béton.

L'augmentation de la température du béton est une cause de perte de maniabilité et chaque constituant y participe différemment en fonction de son dosage et de sa chaleur massique. Par exemple, on retiendra, toute chose égale par ailleurs, que, dans le domaine courant :
– une augmentation de 10 °C du ciment élève de 1 °C la température du béton ;
– une augmentation de 10 °C de l'eau élève de 2 °C la température du béton ;
– une augmentation de 10 °C des granulats élève de 7 °C la température du béton (figure 1).

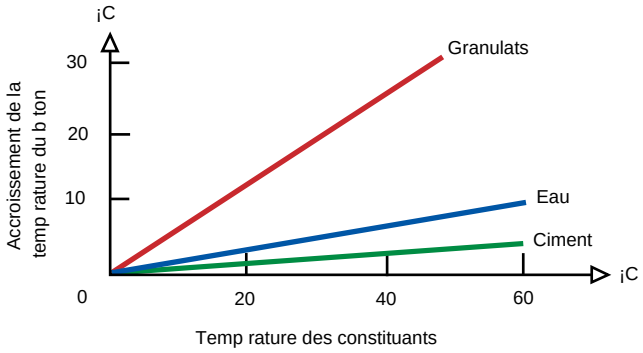


Figure 1 : accroissement de la température du béton en fonction de celle des constituants.

Avec l'accroissement de la température du béton, les propriétés physico-chimiques du matériau sont sensiblement modifiées.

La rhéologie

Pour une composition donnée d'un béton, la maniabilité caractérisée par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams évolue (figure 2).

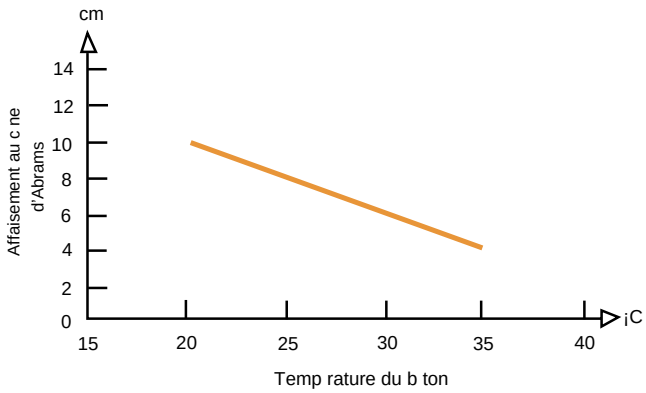


Figure 2 : évolution de l'affaissement au cône en fonction de la température.

Pour une élévation de la température du béton, il y a une importante perte de l'ouvrabilité qui, en outre, peut se manifester très rapidement après la préparation du béton. La solution de rajouter de

l'eau pour palier cette perte d'ouvrabilité est interdite car elle entraîne une baisse de la résistance mécanique obtenue sur le béton à toutes les échéances (figure 3).

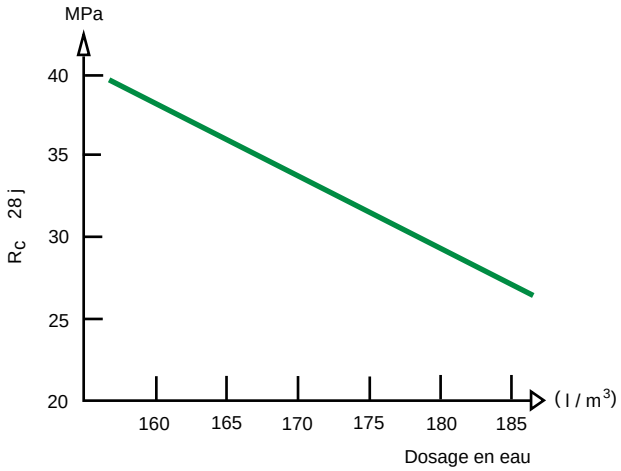


Figure 3 : évolution des résistances d'un béton en fonction de l'augmentation de la teneur en eau.

Les temps de prise

L'augmentation de la température accélère les réactions chimiques : la prise du béton est plus rapide (figure 4).

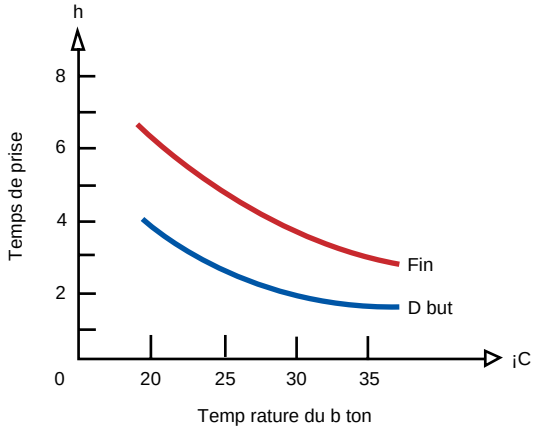


Figure 4 : évolution du temps de prise du béton en fonction de la température.

Les résistances mécaniques

Une forte élévation de la température provoque aux échéances précoces (1 ou 2 jours) une augmentation de la résistance du béton. Cela se traduit généralement par une résistance du béton à 28 jours moins élevée que celle du même béton qui aurait été conservé à une température plus basse.

Il est important de tenir compte de ce phénomène (figure 5) et il faut se souvenir que les réactions d'hydratation sont plus ou moins exothermiques selon les types de ciment et que cet effet se cumule avec celui de la température extérieure.

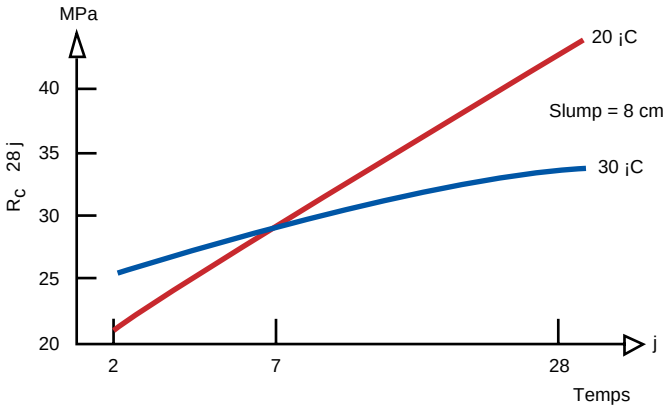


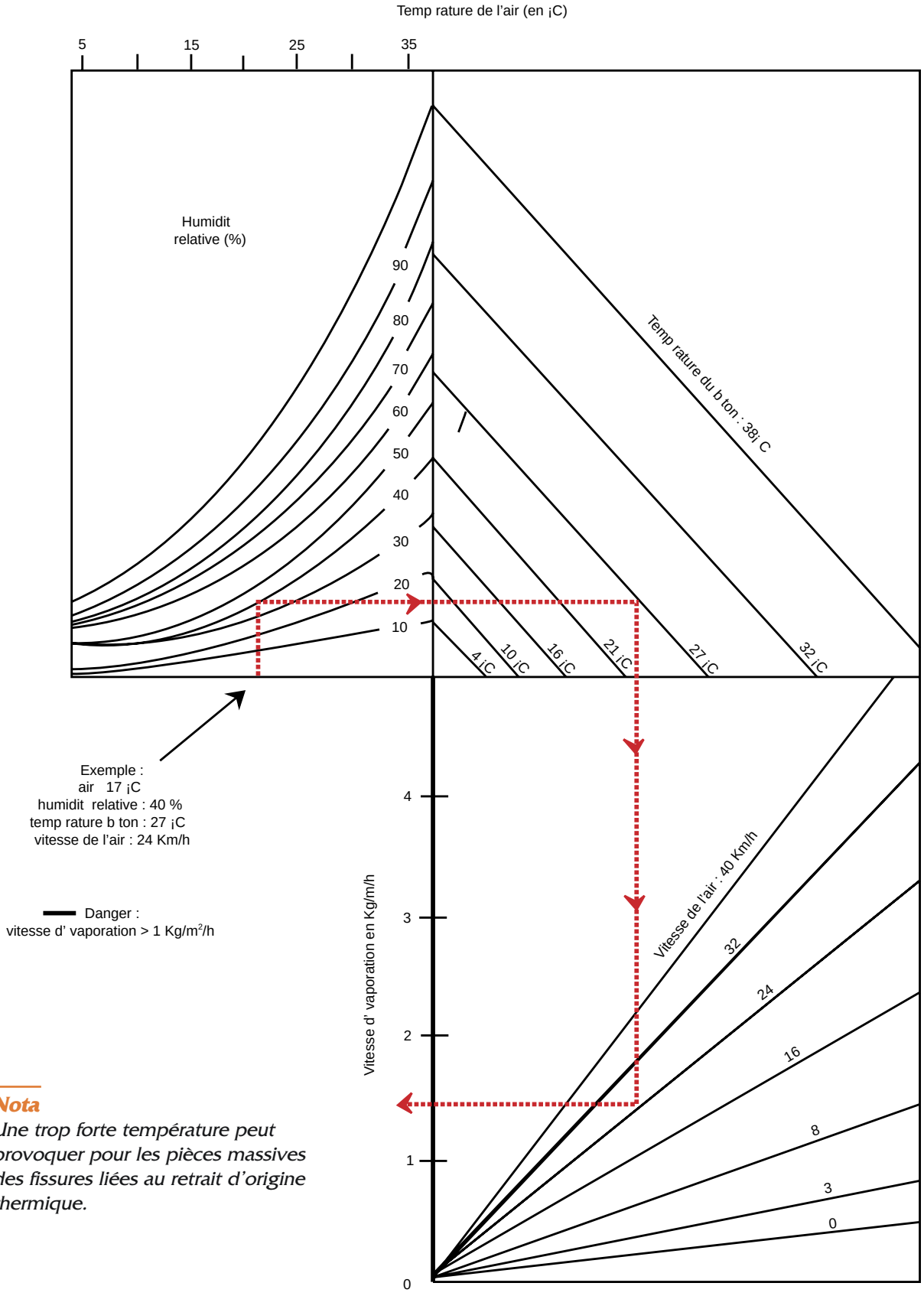
Figure 5 : évolution des résistances en compression en fonction de la température.

La fissuration

Une évaporation trop rapide de l'eau du béton peut entraîner quelques heures après le décoffrage des fissures de retrait plastique. Dans la pratique, il est conseillé de ne pas dépasser une vitesse d'évaporation supérieure à 1 kg/m²/h. Elle est d'autant plus importante que :
– la température ambiante est élevée,
– la température du béton augmente,
– l'air est sec.
L'abaque de l'American Concrete Institute (ACI) permet d'estimer la quantité d'eau évaporée du béton en fonction de ces trois paramètres (figure 6).

Préconisations pour le bétonnage par temps chaud

Les services météorologiques donnent des informations sur les conditions climatiques d'un site donné. Pour des chantiers importants, il peut être nécessaire de compléter l'information des services spécialisés par un suivi précis de l'évolution locale.



Nota

Une trop forte température peut provoquer pour les pièces massives des fissures liées au retrait d'origine thermique.

Figure 6 : abaque permettant de calculer la vitesse d'évaporation de l'eau à la surface du béton en fonction des conditions atmosphériques (température, humidité relative, vitesse du vent et température du béton).

Par temps chaud, il conviendra de respecter quelques règles simples afin d'obtenir en œuvre un béton dont les caractéristiques correspondent aux attentes des maîtres d'ouvrage. Des modifications de la formulation du béton peuvent dans les cas extrêmes s'avérer nécessaires. À l'égard des granulats (sable, gravillon) qui constituent l'essentiel de la masse du béton, c'est au niveau des conditions de stockage que des protections sont à mettre en place, elles peuvent être complétées par un arrosage plus ou moins intensif, apport d'eau dont il convient de tenir compte dans la composition du béton. Bien que le choix du type de ciment soit dicté par des considérations liées à l'ouvrage réalisé et aux conditions d'environnement, il peut être utile de rechercher un ciment faiblement exothermique. L'eau utilisée pourra être refroidie.

Au niveau de la formulation du béton, il est possible d'associer un ou plusieurs adjuvants, un retardateur de prise qui prolongera le temps d'utilisation, un plastifiant réducteur d'eau qui permet de maintenir le rapport E/C. Il est important dans cette hypothèse de réaliser des études préalables de compatibilité ciment-adjuvant en les menant dans les conditions climatiques proches de celles du chantier afin de vérifier que la maniabilité reste satisfaisante pendant une durée compatible avec les conditions de transport et de mise en œuvre.

Lorsque le chantier est approvisionné par des centrales de béton prêt à l'emploi, il faut s'efforcer de réduire les temps de transport et d'attente et limiter le stationnement en plein soleil des camions malaxeurs.

Au niveau de la mise en œuvre du béton, il peut être utile de refroidir les coffrages et il convient toujours de bétonner en dehors des heures les plus chaudes de la journée. En aucun cas, il ne faudra rajouter d'eau à un béton dont l'ouvrabilité s'avère médiocre.

Après coulage, le béton doit être protégé de la dessiccation, notamment les surfaces exposées au soleil et au vent, par un produit de cure ou par une bâche (paillassons humides, films plastiques, etc.). Cette protection doit être maintenue en place durant les premières heures voire quelques jours selon l'évolution des conditions climatiques.

La qualité et la durée de vie du béton se jouent aux tous premiers âges, période où il est particulièrement sensible. Les précautions prises pour bétonner par temps chaud peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.

2.7.2 - Le bétonnage par temps froid

Les conditions climatiques ont une influence très importante sur la qualité finale du béton. On doit s'en préoccuper dès sa fabrication et jusqu'à sa maturité en passant par son transport, sa mise en œuvre et sa cure.

En règle générale, lorsque la température mesurée sur chantier est inférieure à – 5 °C, la mise en place du béton est déconseillée. Entre – 5 °C et + 5 °C, elle ne peut se faire qu'avec des moyens efficaces pour prévenir les effets dommageables du froid. Le présent document ne traite que de l'effet des basses températures sur le béton frais. L'effet du gel sur béton durci faisant partie d'un chapitre spécifique : « La tenue au gel des bétons durcis ».

Conséquences de la baisse de température sur les bétons frais

Sur béton frais, la baisse de température dans une plage n'atteignant pas le gel, ralentit les réactions exothermiques d'hydratation du ciment. On constate :
– un retard du début de prise (figure I) ;
– un allongement du temps de durcissement (figure II).
On observe aussi une augmentation du ressuage.

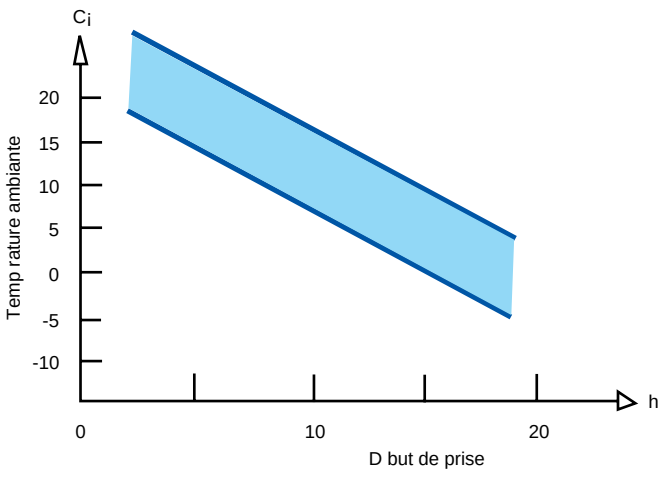


Figure I : début de prise du béton en fonction de la température.



Conséquences du gel sur le béton frais

Lorsque le béton frais gèle, les réactions d'hydratation cessent et le durcissement est complètement arrêté.

Si le gel intervient avant le début de prise, il provoque uniquement un gonflement, le durcissement reprenant normalement dès que la température redevient positive (vers 5 °C). L'effet du gonflement conduit néanmoins à une baisse de résistance. Si le gel intervient au début du durcissement, la porosité est augmentée, l'adhérence pâte-granulat diminue et les résistances mécaniques sont fortement altérées. Dans ce cas, les dommages sont irréversibles, il est donc extrêmement important d'anticiper l'évolution climatique avant la mise en œuvre et de prendre les dispositions nécessaires. La résistance finale du béton est d'autant plus affectée que le gel du béton est précoce.

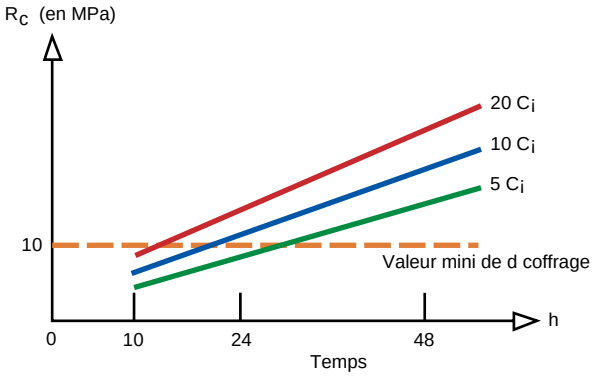


Figure II : Délai de décoffrage en fonction de la température.

Précautions à prendre pour le bétonnage par temps froid

Pour mettre en œuvre correctement par temps froid, il est indispensable :
– d'adapter la composition du béton ;
– d'apporter et de maintenir une quantité de chaleur au béton frais ;
– de maintenir ces dispositions de protection en place au-delà des délais habituels.

Composition du béton

La composition du béton devra être soigneusement étudiée notamment sur :
– **le choix du ciment** : un ciment de type CEM I de classe 52,5 ou 42,5 (ou de sous classe R) est recommandé ;
– **le dosage du ciment** : il est recommandé de se tenir à des dosages élevés supérieurs à 330 kg/m³,
– **le choix des granulats** : les granulats seront non poreux, non gélifs, propres et non gelés,
– **le dosage en eau** : le dosage en eau devra être le plus faible possible,
– **l'adjuvantation** : l'emploi d'adjuvants tels que réducteurs d'eau, accélérateurs de prise et accélérateurs de durcissement est conseillé. Il est indispensable de réaliser des études préalables de compatibilité ciment-adjuvant et de les mener dans les conditions voisines du chantier.

Apport et maintien de chaleur

Chauffage : le béton peut être chauffé lors de sa fabrication par l'eau ou les granulats. Il peut être ensuite maintenu à température par chauffage de l'atmosphère ambiante ou du coffrage.

Le ciment, l'eau et les granulats contribuent dans des proportions variables à l'élévation de la température du béton (ex : figure III) – voir l'exemple donné à la page 78.

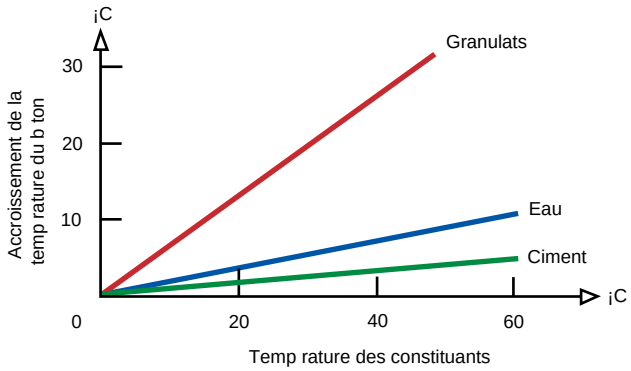


Figure III : accroissement de la température du béton en fonction de la température des constituants.

Calorifugeage : les coffrages pourront comporter une isolation qui limitera les échanges thermiques avec l'extérieur.

Transport : le transport du béton frais ainsi que l'attente des toupies seront le plus court possible.

Étuvage : l'étuvage du béton au cours de son durcissement accélérera l'hydratation du ciment.

Protection de surface : la surface du béton en contact avec l'air devra être protégée du froid, par exemple avec une bâche isolante.

Maintien des dispositions de protection :
– les protections de surface doivent être maintenues au moins pendant 72 heures ;
– le décoffrage ne doit être effectué que si le béton a atteint une résistance mécanique suffisante de l'ordre de 10 MPa, – les dispositifs d'étaiement doivent être maintenus en place pendant la période froide en particulier en présence de gel.

Toutes ces mesures peuvent générer des coûts supplémentaires qui, de toute façon, seront moindres que ceux liés aux réparations ultérieures.



Cas des ciments à durcissement rapide

Les ciments à durcissement rapide comme le ciment d'aluminates de calcium fondu et le prompt, dégagent leur chaleur d'hydratation sur un temps très court. L'échauffement obtenu permet le bétonnage par des temps très froids (– 10 °C) ou dans des chambres froides. Les précautions à prendre sont identiques à celles des bétons de ciments courants. On se référera aux préconisations d'utilisation des fabricants.

2.8 Les coffrages de chantier

2.8.1 - Le rôle du coffrage

Une propriété essentielle du béton est son aptitude à épouser la forme dans laquelle on le coule lorsqu'il est encore à l'état frais. Sur chantier, les outils utilisés pour le moulage du béton sont les coffrages. Pour les ouvrages verticaux, tels que murs, voiles verticaux, poteaux, ces coffrages appelés banches ont donné lieu à l'expression « béton banché », qui désigne le béton coulé dans des banches.

Le coffrage constitue l'outil essentiel en matière de réalisation d'ouvrages en béton. Il a beaucoup évolué ces dernières années pour mieux s'adapter à des besoins de plus en plus complexes et variés.

Grâce aux coffrages, le béton coulé *in situ* demeure pour beaucoup d'ouvrages une solution économique et parfois la seule utilisable lorsque le volume de la réalisation est très important ou lorsque les éléments à réaliser ne sont pas suffisamment répétitifs pour justifier leur préfabrication.



2.8.2 - La conception des coffrages

Si le choix des coffrages dépend de l'ouvrage à réaliser et du nombre de ses réemplois, on peut néanmoins dégager un certain nombre d'exigences communes qu'ils doivent satisfaire.

Indéformabilité et stabilité

Un coffrage doit être indéformable sous l'effet de la poussée du béton et lors de la vibration. Le respect des tolérances dimensionnelles de l'ouvrage dépend directement de ce critère.

La conception du coffrage doit donc s'attacher à respecter cette indéformabilité et cette stabilité en considérant la pression statique exercée par le béton (dans les cas courants 2 à 6 t/m^2 selon la hauteur du bétonnage) et les contraintes dynamiques qui découlent de la vibration (qui varient selon le mode de vibration et le type de vibrateurs et de leur répartition).

La conception est fonction du nombre de réemplois. En particulier en cas de réutilisation fréquente, l'altération de certains types de coffrages (en bois notamment) est de nature à modifier leurs caractéristiques mécaniques et dimensionnelles ainsi que l'aspect final du béton.

Étanchéité

Un coffrage est constitué par la juxtaposition de panneaux ou éléments ; l'absence d'étanchéité aux



joints a pour effet de laisser passer l'eau ou la laitance du béton, ce qui provoque sur le parement des défauts d'aspect : hétérogénéité de texture et de teinte, nids de cailloux.

Pour les bétons destinés à rester apparents, l'étanchéité des coffrages doit être particulièrement soignée.

État de surface

Un coffrage est le négatif de l'ouvrage à réaliser. Tout défaut de surface de coffrage se retrouvera donc sur le parement de l'ouvrage. Si un effet décoratif peut être recherché volontairement en utilisant par exemple le veinage des planches ou leur assemblage, il n'en va pas de même lorsqu'il s'agit de défauts tels que trous, déformations de surface dues à des chocs, têtes de boulons, désaffleurements.

2.8.3 - Les différents types de coffrages

Les coffrages en bois

Matériau sciable et clouable, le bois est l'un des premiers matériaux utilisés pour la réalisation de coffrages. Du fait de sa texture et de ses possibilités d'assemblage, le coffrage bois présente de nombreux avantages pour les bétons apparents structurés et pour les ouvrages de formes complexes et non répétitifs.

Les planches utilisées pour les coffrages doivent être suffisamment épaisses pour éviter un gauchissement (27 à 40 mm), tirées d'essences de bois exempts de tanin, secs et stabilisés. Pour certaines applications, on utilise des bois poncés, rabotés ou traités pour mettre, par exemple, le veinage en valeur (soude, brossage). Ces coffrages, dont l'exécution s'apparente parfois à l'ébénisterie, permettent la réalisation de bétons apparents de qualité, présentant des textures variées.

Les caractéristiques du bois se modifient au cours des réemplois (porosité plus faible, usure de la surface) ; ces modifications peuvent avoir une influence sur la teinte et l'aspect du parement.

Pour les surfaces importantes et planes, le coffrage peut être réalisé en panneaux de contreplaqué. Mais il est également utilisable pour les petits éléments de forme complexe, du fait de sa facilité de découpe. Pour un grand nombre de réemplois, on utilise surtout des panneaux de type CTB X (contreplaqué marine imperméable) en épaisseur de 16 à 19 mm, dont la surface peut être bakélisée pour augmenter encore sa longévité.



Les coffrages métalliques

Les coffrages métalliques se sont beaucoup développés dans le bâtiment. Ils permettent de rationaliser la mise en œuvre du béton et contribuent à l'amélioration de la productivité du chantier. Leurs possibilités de réemploi sont appréciables pour des éléments à caractère répétitif – voiles verticaux, planchers et poteaux. L'utilisation de raidisseurs permet la réalisation d'éléments de grandes surfaces.

Ce type de coffrages, bien que lourd, a su évoluer en fonction des besoins :
– coffrages modulaires ;
– coffrages repliables pour le transport, type banches containers et tables coffrantes ;
– coffrages glissants, grimpants, à géométrie variable (tours de refroidissement et voussoirs pour ponts) ;



Coffrage tunnel demi-coquille.

– coffrages tunnels pour les programmes d'une certaine ampleur (plus de 50 logements) utilisant une trame déterminée ;
– banches support de prédalles, etc.

L'acier donne au béton une surface lisse. La conductibilité de l'acier favorise la dissipation de chaleur due à l'hydratation du ciment ; c'est un critère favorable par temps chaud. À l'inverse, par temps froid, le béton est moins bien protégé contre des chutes de température, ce qui peut alors nécessiter un calorifugeage du coffrage. Compte tenu de sa rigidité, ce type de coffrage est bien adapté à la vibration externe du béton.

Les coffrages en matériaux de synthèse

Les matériaux de synthèse sont surtout utilisés pour réaliser la peau du coffrage : ils apportent une bonne qualité de parement et se démoulent facilement. Ce type de coffrages est intéressant pour l'obtention de reliefs variés, grâce à des matrices thermoformées en PVC ou en polyéthylène, ou à des matrices sculptées en polystyrène expansé. Le plastique est également utilisé pour la réalisation de coffrages modulaires de petites dimensions (0,5 à 1 m²) manipulables à la main.

D'un assemblage facile, les éléments sont bien adaptés aux petits chantiers, où leur souplesse d'emploi est appréciée par l'artisan qui peut réaliser les différents ouvrages sans engin de manutention.

2.8.4 - La préparation des coffrages

La préparation des coffrages porte principalement sur les points suivants.

La vérification du positionnement et de la stabilité

Sur la plupart des coffrages, des cales, des taquets ou des vérins permettent une mise à niveau et un assemblage qui doivent être vérifiés avec soin. Les étais, assurant la stabilité au vent, doivent être correctement fixés et réglés. Sur la plupart des banches métalliques, il existe des systèmes intégrés, dont la mise en place est rapide et sûre.



Coffrage transportable modulaire en plastique moulé.

L'étanchéité

Elle est directement liée au bon positionnement des éléments constitutifs du coffrage et à leur assemblage. L'emploi de joints souples et de couvre-joints peut constituer une solution efficace.

Le nettoyage

Il faut veiller à éliminer tout ce qui peut constituer une source de salissures ou d'altération du béton : boulons, ligatures, déchets végétaux, rouille ; l'eau stagnante doit être évacuée.





La complexité de certains ouvrages fait appel à des coffrages-ébénisterie, des coffrages métalliques structurés ou des coffrages de très grandes dimensions.

La préparation de la surface

Après nettoyage et enlèvement de toute trace de béton adhérent, le produit de démoulage doit être appliqué de façon régulière sur toute la surface, sans excès.

2.8.5 - Les produits de démoulage

Pour limiter les phénomènes d'adhérence, on utilise des produits de démoulage qui ont plusieurs fonctions : protéger la surface coffrante en vue de son réemploi, faciliter l'entretien du coffrage, limiter l'oxydation et la corrosion des coffrages métalliques, imperméabiliser les coffrages à base de bois.

Les produits de démoulage, qui étaient à l'origine essentiellement des huiles minérales, se sont beaucoup développés et diversifiés. On trouve aujourd'hui des émulsions, des résines, des cires et des agents chimiques qui s'opposent aux réactions de liaison à l'interface béton/coffrage. Le choix du produit de démoulage et sa bonne application ont une grande influence sur la qualité du parement, en particulier sur la teinte et le bullage. Les produits de démoulage doivent aussi :

– ne pas adhérer au béton après sa prise, ni le tacher ou l'altérer ;
– permettre l'application ultérieure de revêtements (carrelage, peinture) sans nuire à leur adhérence.

L'application du produit de démoulage à la brosse ou par pulvérisation doit être faite de façon uniforme, en un film mince, sans défaut ni excès. Les coffrages bois doivent être humidifiés avant emploi.

Incidences des principaux paramètre liés aux coffrages et aux produits de démoulage sur la qualité du béton

Paramètres			***Conséquences***	***Dispositions à prévoir***
Les coffrages	Rigidité insuffisante		Non respect des tolérances dimensionnelles, ségrégation et bullage	Conception : raidisseurs de coffrages et épaisseur de la peau
	Défaut détanchéité		Nids de cailloux par départ d'eau ou de laitance	Emboîtement des panneaux Bandes de joints et couvre joints étanches, mastics, etc.
	Peaux de coffrage	– à surface absorbante	Teinte du béton plus foncée	Saturation en eau du coffrage Produits de démoulage imperméabilisant
		– à surface oxydée	Taches, trace de rouille	Nettoyage. Produit de démoulage anticorrosion
Les produits de démoulages	Répartition inégale		Variations de teinte	Soin dans l'application, surtout sur les parties verticales
	Excès		Taches sur le béton	Emploi de produits se fixant mieux sur les parois : cires, agents chimiques de démoulage
	Parties non traitées		Arrachement au décoffrage	

2.9 La vibration du béton sur chantier

2.9.1 - Le rôle de la vibration

La vibration appliquée au béton frais a pour fonction de favoriser l'arrangement des grains qui sont les constituants du béton. Son rôle est double :
– la mise en place est facilitée : remplissage des moules, enrobage des armatures ;
– le béton obtenu présente une compacité plus forte, avec moins de vides d'air (effets de serrage).
Par voie de conséquence, il est possible de faire des bétons avec un taux d'eau de gâchage plus faible, ce qui a pour effet de diminuer leur porosité, d'accroître leurs caractéristiques mécaniques et leur durabilité et d'améliorer leur aspect de surface.



L'aiguille vibrante : un matériel devenu d'utilisation courante.

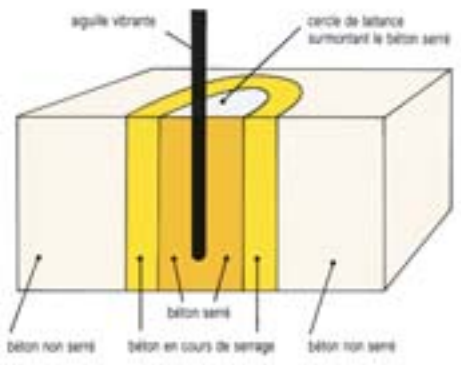
2.9.2 - Comment agit la vibration ?

Il ressort des recherches conduites sur ce sujet, que la vibration transmise aux différents grains constituant le béton, se traduit par un déplacement de ceux-ci, selon un mouvement alternatif rapide et de faible amplitude. Ces mouvements internes développent des forces facilitant l'arrangement optimal des grains. Sous l'effet de forces dues à la pesanteur et à la pression exercée par la masse du béton, les grains tendent alors à adopter une disposition plus compacte, les grains les plus fins s'insérant entre les plus gros.

Soumis à la vibration, le béton se comporte comme un corps plastique caractérisé par une certaine viscosité et dont l'abaissement du seuil de cisaillement (valeur minimale de la force assurant le déplacement d'une surface par rapport à une autre dans un fluide plastique) facilite l'écoulement. Lors de la vibration, l'énergie absorbée par le béton est d'autant plus grande que sa structure est plus aérée, les bulles d'air jouant un rôle d'amortisseur.

On constate autour d'une aiguille vibrante plongée dans le béton, une succession de zones concentriques :
– la zone périphérique déjà serrée et désaérée ;
– une zone en cours de plastification qui absorbe la totalité de l'énergie au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source vibratoire ;
– une zone qui ne reçoit pratiquement pas d'énergie.

Les deux premières zones constituent le rayon d'action de l'aiguille vibrante.



Différentes zones dans un béton soumis à l'action d'une aiguille vibrante.

2.9.3 - Les effets de la vibration

Sur le béton frais

Expulsion de l'air

L'abaissement des forces de frottement (effet de liquéfaction du béton) rend prédominantes les forces de gravité. L'air, qui a une densité très faible par rapport à celle du milieu environnant, se trouve par contre soumis à une force ascensionnelle importante, qui tend à le faire remonter à la surface. Ce phénomène est nettement visible lors de la vibration. L'arrêt du dégagement d'air marque le moment où la vibration n'a plus d'effet sur le serrage du béton et peut même devenir néfaste en provoquant la ségrégation des granulats plus lourds par rapport à la laitance de ciment plus légère. Ce phénomène se trouve inversé avec les granulats légers qu'un excès de vibration peut faire remonter à la surface.

Amélioration de la maniabilité

La vibration a pour effet d'améliorer la viscosité du béton ; il y a donc tout intérêt à réduire l'eau de gâchage, (par exemple en utilisant un adjuvant) dont une partie importante n'est pas nécessaire à l'hydratation du ciment, mais sert uniquement à rendre le béton plus plastique. Une vibration adaptée permet donc la mise en place efficace de bétons fermes contenant peu d'eau et, qui, une fois durcis, ont l'avantage d'avoir une faible porosité.



Sous l'effet de l'aiguille vibrante, l'air contenu dans le béton remonte à la surface.

Sur le béton durci

Les effets de la vibration sur le béton frais se traduisent, pour le béton durci, par des caractéristiques améliorées :
– une porosité réduite par l'effet cumulé du serrage, du départ de l'air et de la réduction d'eau nécessaire pour assurer la maniabilité du béton ;
– une homogénéité améliorée par une vibration transmise à la totalité de sa masse ;
– un enrobage efficace des armatures.

2.9.4 - Les paramètres de la vibration

Énergie

L'énergie transmise au béton par le vibrateur est proportionnelle à la masse du balourd en rotation, à son excentricité et au carré de sa vitesse. Elle caractérise l'efficacité d'un appareil et doit être la plus élevée possible, tout en restant compatible avec la taille du vibrateur.

Fréquence

La fréquence optimale varie suivant la taille des granulats. Une fréquence basse (environ 10000 vib./mn) favorise la vibration des gros granulats, une fréquence élevée (environ 20000 vib./mn) celle des éléments plus fins.

Amplitude

C'est un paramètre qui détermine en particulier le déplacement des constituants du béton durant une demi-vibration, mais sa mesure est délicate.

On peut cependant dire qu'une trop forte amplitude favorise la ségrégation, surtout avec un béton mou. On a donc intérêt à la limiter et à privilégier l'augmentation de la fréquence.

Durée

La durée de vibration est importante, car si elle est trop courte, le béton est insuffisamment serré, si elle est trop longue, elle peut entraîner une ségrégation de ses constituants.

Les effets de la vibration en fonction du temps se caractérisent par une action rapide qui diminue très vite, une fois obtenus l'arrangement des grains et l'expulsion de l'air. À titre indicatif, les temps nécessaires à la vibration d'un volume de béton (en pervibration, c'est-à-dire le temps où l'aiguille est laissée au même emplacement) sont de l'ordre de :
– 5 secondes pour les bétons mous ;
– 20 secondes pour les bétons plastiques ;
– 1 minute pour les bétons fermes.

2.9.5 - Les matériels de vibration

Les matériels de vibration se répartissent en deux catégories principales :
– ceux qui fournissent une vibration interne au béton (ou pervibration) – le vibrateur agit directement au sein du béton ;
– ceux qui apportent une vibration externe – le vibrateur agit sur le béton par l'intermédiaire d'un coffrage ou d'une poutre.

Les vibrateurs internes

Simples et efficaces, couramment utilisés sur chantier, ils sont appelés aiguilles vibrantes et sont constitués par un tube métallique dans lequel la rotation d'une masselotte excentrée produit la vibration. Différentes formes d'énergie sont utilisées qui conduisent à des conceptions différentes : pneumatique, électrique, thermique.

Le diamètre des aiguilles usuelles varie de 25 à 100 mm. Leur fréquence est comprise entre 10000 et 20000 vib./mn. Indépendamment du fait qu'une aiguille doit être choisie en fonction de sa masse qui la rend plus ou moins manœuvrable et d'un diamètre compatible avec l'espacement

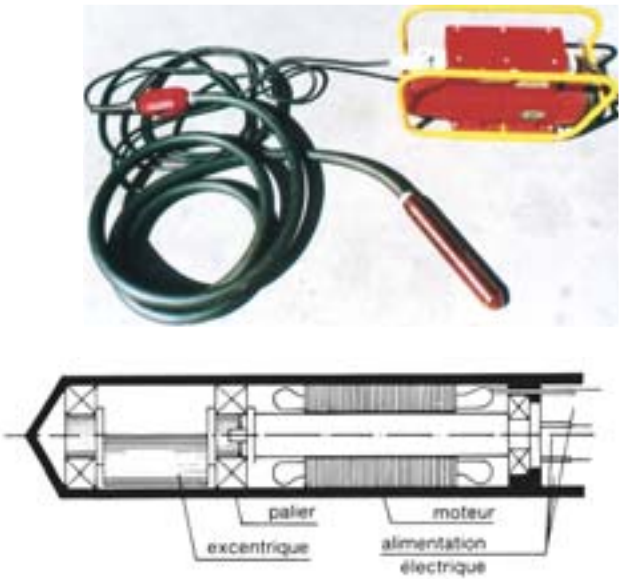


Schéma d'un vibrateur électrique : le moteur d'entraînement est logé directement dans le corps de l'aiguille.

des armatures entre lesquelles elle doit pouvoir facilement se positionner, les principaux critères de choix restent le volume du béton à vibrer et sa granulométrie.

Les aiguilles de 25 à 70 mm sont plutôt utilisées pour des volumes de béton n'excédant pas 10 m³ et dont le diamètre des plus gros granulats est inférieur à 25 mm. Les aiguilles de plus de 70 mm sont utilisées pour des volumes de 10 à 30 m³ de béton avec de fortes granulométries.

Les vibrateurs externes

Nous ne traitons pas des tables vibrantes, dont l'usage est réservé à la préfabrication. Sont utilisés sur les chantiers, les vibrateurs de coffrages et les vibrateurs de surface.

Les vibrateurs de coffrages

De même que les aiguilles, les vibrateurs de coffrages utilisent le principe de la vibration produite par la rotation d'une masselotte excentrée. Fixés sur les coffrages, les vibrateurs imposent que ceux-ci soient suffisamment lourds et rigides pour ne pas se déformer et transmettre la vibration de façon homogène.

La fréquence de vibration des vibrateurs électriques est le plus souvent de 3000 ou 6000 vib./mn. Les vibrateurs pneumatiques atteignent des fréquences plus élevées : entre 10000 et 15000 vib./mn. La profondeur de béton intéressée

par la vibration ne dépassant pas généralement 20 à 25 cm, ce type de vibrateur est réservé à des pièces d'épaisseur moyenne : murs, voiles, poteaux, poutres.

Les vibrateurs de surface

Les vibrateurs de surface permettent de transmettre la vibration à partir d'une règle ou d'une poutre déplacée sur la surface du béton. Le vibrateur est fixé sur la règle qui doit présenter une rigidité et une inertie suffisantes. Ce type de vibration est réservé aux dalles, aux voiries en béton et, de façon générale, à tout élément horizontal de faible épaisseur (15 à 20 cm au maximum).



Vibrateur de coffrage : l'appareil et son utilisation sur chantier in situ.



2.9.6 - Les règles de bonne pratique

Les règles de bonne pratique concernent essentiellement le temps de vibration et les emplacements des vibrateurs et leurs fréquences. Le temps de vibration lié à la nature du béton (granulométrie, consistance), au volume à vibrer, à la densité de ferraillage, varie également en fonction du type de vibrateurs et de leur puissance. Certains indices permettent d'apprécier le moment requis pour arrêter la vibration :

– le béton cesse de se tasser ;
– le dégagement de bulles d'air s'arrête ;
– la laitance apparaît en surface.

La vibration interne

L'emploi des aiguilles vibrantes requiert quelques précautions :

– vibrer des couches successives ne dépassant pas 40 à 50 cm d'épaisseur et, en tout état de cause, d'épaisseur inférieure à la longueur de l'aiguille vibrante utilisée ;
– faire pénétrer l'aiguille dans la couche sous-jacente sur environ 10 cm ;
– laisser l'aiguille s'enfoncer sous son propre poids et, lors de sa sortie du béton, laisser la cavité se refermer ;
– éviter de s'approcher des armatures et du coffrage, ce qui risquerait de provoquer des parements d'aspect hétérogène ;
– déplacer l'aiguille tous les 30 à 50 cm (soit environ 1,5 fois son rayon d'action) pour les aiguilles courantes de 50 à 75 mm de diamètre.

La vibration externe

L'emplacement des vibrateurs et le temps de vibration sont plus délicats à déterminer, car les paramètres sont nombreux : la nature du moule ou du coffrage, la forme de la pièce, le volume du béton et sa composition. L'expérience, des essais préalables, ainsi que l'assistance des fabricants de vibrateurs sont le plus souvent nécessaires pour obtenir les meilleurs résultats.

Conclusion

La vibration est un moyen efficace de mise en place du béton qui permet en même temps de limiter sa teneur en eau et d'augmenter ses caractéristiques finales par diminution de la porosité.

Il ne faut cependant jamais perdre de vue que l'on ne peut obtenir un bon béton en vibrant un mélange mal formulé et que la vibration doit être adaptée à la composition du béton et aux caractéristiques de l'ouvrage.

La vibration doit être appliquée à la totalité du volume de béton et d'une manière uniforme, sous peine d'entraîner des hétérogénéités, tant au niveau de la porosité et de l'enrobage des armatures qu'au niveau de l'aspect du parement.

Chapitre 3

Les bétons aux nouvelles performances

3.1 Introduction

3.2 Les Bétons à Hautes Performances – BHP

3.3 Les bétons autoplaçants – BAP

3.4 Les bétons fibrés

3.5 Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP

3.1 Introduction

Né avec le xx^{e} siècle, le béton, matériau jeune, a connu ces vingt dernières années des développements considérables. Il a profité en particulier des évolutions de la chimie minérale et organique et de l'amélioration des outils de production. Au-delà des progrès constants du matériau, (sur son ouvrabilité, ses performances mécaniques et sa durabilité), les recherches sur les nouveaux bétons se sont considérablement accélérées depuis 10 ans et ont abouti aujourd'hui aux solutions les plus innovantes tant en termes de conception que de mise en œuvre et d'esthétisme. Les bétons sont devenus les matériaux de **la modernité et de l'innovation.** L'étendue de leurs performances physiques, mécaniques et esthétiques s'élargit sans cesse.

Les qualités initiales de résistances mécaniques se sont déclinées, différenciées. Les bétons s'adaptent désormais à toutes les exigences des concepteurs, aux contraintes des chantiers et aux agressions de l'environnement. Au fil des années, les caractéristiques du béton se sont complexifiées pour répondre à des utilisations de plus en plus diversifiées, à des résistances toujours plus importantes, à des exigences de durabilité plus fortes, à des contraintes esthétiques et à de nouvelles exigences de mise en œuvre (maîtrise de la rhéologie, pompabilité, etc.).

Le béton, composé essentiellement de constituants minéraux, offre des qualités intrinsèques : durabilité, comportement mécanique et résistance aux agressions chimiques, tenue au feu, qualités acoustiques, diversité des formes, des couleurs et des aspects, qui sont les garants d'ouvrages pérennes, efficaces, écologiques, économes et harmonieux.

Les progrès dans la compréhension scientifique des mécanismes de prise et de durcissement, les recherches sur l'optimisation des empilements granulaires et les mécanismes de défloculation ont permis de bouleverser les connaissances sur la rhéologie des bétons frais et la durabilité des bétons durcis. Elles ont débouché sur la mise au point d'une gamme de BÉTONS AUX NOUVELLES PERFORMANCES. Les résistances, la durabilité, l'ouvrabilité et les qualités esthétiques ont enregistré des avancées considérables.

DES BHP… (Bétons à Hautes Performances)

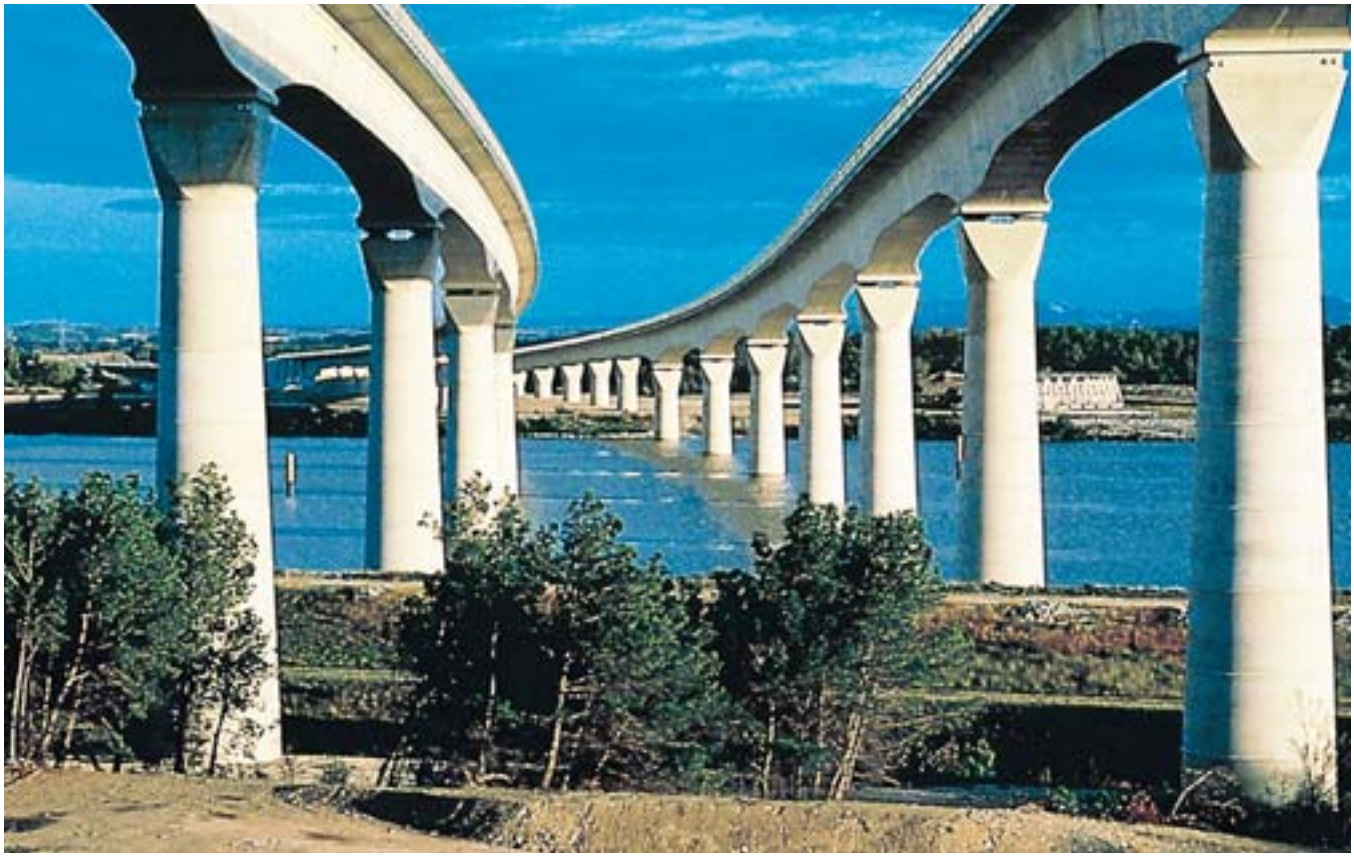
Les recherches sur l'amélioration des résistances mécaniques ont abouti à la mise au point de bétons : les BHP (Bétons à Hautes Performances) bétons très compacts utilisés pour leurs résistances élevées aussi bien à court terme qu'à long terme et leur durabilité exceptionnelle.

AUX BAP… (Bétons autoplaçants)

Les travaux menés sur l'ouvrabilité des bétons ont permis la mise au point de bétons dits autoplaçants, bétons très fluides, homogènes et stables. Cette nouvelle famille de bétons a été développée afin d'obtenir un matériau facile à mettre en œuvre, sans faire appel à la vibration ce qui présente de nombreux avantages sur les chantiers et en usines de préfabrication, tant au niveau de la diminution des nuisances sonores que de l'amélioration des conditions de travail du personnel. Les BAP sont particulièrement adaptés pour les ouvrages de grande hauteur ou de forme complexe et pour les éléments très ferraillés. Ces nouveaux bétons permettent d'obtenir des gains de productivité considérables et offrent de très bons résultats en matière de qualité esthétique des parements.

AUX BÉTONS FIBRÉS… ET AUX BFUP

Issus des bétons fibrés, les BFUP (Bétons Fibrés à Ultra Hautes Performances), aux propriétés mécaniques extraordinaires, laissent libre cours à l'imagination des architectes pour créer des structures allégées et élégantes. Leurs très hautes résistances à la compression et à la traction par flexion offrent de nouvelles possibilités constructives. La variété de leurs applications ne dépend plus que de l'ingéniosité des concepteurs.



Les recherches en matière d'optimisation de formulation des bétons de ces dernières années permettent d'offrir des matériaux aux propriétés adaptables aux contraintes des chantiers et aux spécificités des ouvrages.

Consistance des bétons frais
Il est possible d'obtenir des bétons très fluides (cas du béton autoplaçant) ou au contraire avoir des bétons à très hautes performances très fermes.

Propriétés mécaniques
Résistance à la compression, résistance au très jeune âge, résistance en traction, aptitude à résister à la fissuration, etc.

Durabilité
La recherche d'une grande durabilité face aux agressions de l'environnement est un souci permanent.

Aspects esthétiques
Ils peuvent se créer au niveau de la micro-rugosité de surface, de la teinte, de la texture et ils sont déclinés par une multitude de traitements de surface.

Les BHP, les BAP, les BÉTONS FIBRÉS et les BFUP sont les bétons de demain, ils s'imposent progressivement. D'ici dix ans ces nouveaux bétons seront utilisés sur la grande majorité des chantiers.

Ces nouveaux bétons sont une réponse :
– aux préoccupations environnementales ;
– aux nouvelles exigences des normes européennes qui mettent en valeur l'importance de la durabilité des ouvrages ;
– aux soucis d'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines ;
– aux besoins des maîtres d'ouvrage vis-à-vis de la gestion durable du patrimoine ;
– aux exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
– aux nécessités des gestionnaires d'ouvrages de limiter les coûts de maintenance et de réparations et de réduire les gênes aux usagers ;
– aux contraintes économiques des entreprises ;
– aux demandes croissantes de nos concitoyens pour l'amélioration de leur cadre de vie et de leur confort.

Avec le béton, matériau du quotidien minéral et recyclable, les solutions constructives répondent à toutes les exigences en matière de sécurité, d'esthétisme et de durabilité et offrent de nouvelles potentialités d'expression et de créativité aux ingénieurs comme aux architectes.

3.2 Les Bétons à Hautes Performances – BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) ont d'abord été utilisés pour leur haute résistance. Cette caractéristique facilement mesurable a fait des progrès spectaculaires à partir des années quatre-vingt. Elle est passée de 30/35 MPa à plus de 100 MPa pour les bétons à très hautes performances, voire plus (150 à 200 MPa pour des bétons fibrés à ultra hautes performances, BFUP).

Les gains de résistance ne sont pas les seuls avantages de ces bétons qui tirent leurs propriétés de leur microstructure très dense, d'une forte réduction de leur porosité et d'un réseau capillaire non connecté.

Ces bétons sont, en fait, des matériaux à très haute compacité.

Les BHP sont également, du fait de leur porosité extrêmement réduite, plus résistants aux agents agressifs et, de façon générale, présentent une durabilité accrue. Ils permettent d'optimiser les structures, de réaliser des ouvrages soumis à des contraintes élevées ou subissant un environnement sévère (climat, agressions marines, effets du gel, attaques acides, etc.)

Hautes performances signifient aussi facilité de mise en œuvre et souplesse d'adaptation aux contraintes d'exécution des ouvrages. En effet, les BHP offrent aussi des résistances exceptionnelles à l'état frais (rhéologie, pompabilité, etc.) et des performances aux jeunes âges, ce qui permet par exemple d'accélérer les cadences de fabrication en usine ou sur chantier ou de pomper le matériau sur de longues distances. Ils confèrent une pérennité architecturale aux ouvrages et augmentent considérablement leur durabilité en réduisant corrélativement les frais de maintenance et d'entretien. Les clefs de ces performances sont :

– la réduction de la quantité d'eau opérée par l'ajout de superplastifiants ;
– l'optimisation de la répartition granulométrique des composants.



Cette optimisation de leurs performances est due, en particulier, aux récentes évolutions technologiques des adjuvants qui permettent des formulations avec une forte réduction du dosage en eau tout en conservant une maniabilité adéquate et à l'utilisation complémentaire éventuelle d'ultrafines qui complètent les vides du squelette granulaire entre les grains de ciment et améliorent la compacité.

Les BHP ont été d'abord employés pour la réalisation de structures exceptionnelles. Les ouvrages d'art ont constitué, historiquement en France, un domaine d'application privilégié des BHP. Ils ont ensuite, pour les ouvrages exceptionnels, fait leurs preuves sur de nombreuses réalisations. Ils sont utilisés depuis de nombreuses années en préfabrication.



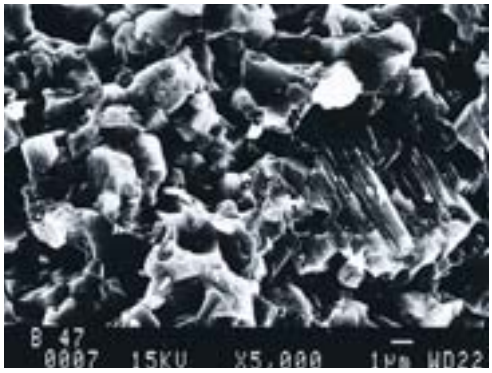
Grâce à une approche volontariste de la part de l'ensemble des acteurs de la construction, leurs utilisations se banalisent depuis plusieurs années en valorisant toutes leurs propriétés physico-chimiques sur des ouvrages courants de toute sorte. Leur intérêt économique a été clairement mis en lumière lors de réalisation de nombreux ouvrages.

Les BHP ont rapidement démontré qu'ils permettaient d'offrir un potentiel de progrès extraordinaire pour la construction de bâtiments et de structures de génie civil. Ils sont désormais valorisés par d'autres performances que la simple résistance mécanique, telles que la rhéologie à l'état frais, la durabilité à long terme et l'esthétisme des structures. Ce concept de valorisation des performances du béton autre que la résistance mécanique est à la base du développement de tous les bétons modernes (BAP, BFUP, etc.).

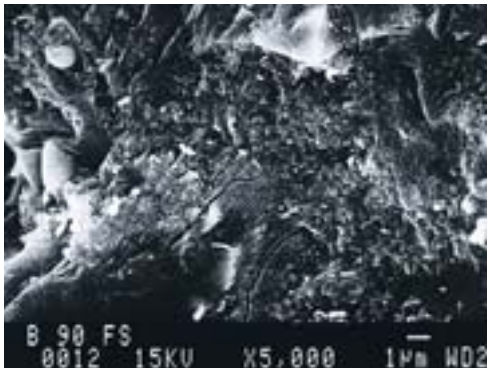
3.2.1 - Définition des BHP

Les Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérisent par :
– une résistance à la compression à 28 jours supérieure à 50 MPa sur cylindre ;
– un rapport Eau efficace/liant équivalent inférieur à 0,4.

Ils présentent une microtexture très dense et une faible porosité et sont donc très résistants à la pénétration d'agents agressifs.



Béton courant



BHP

Le BHP présente, à l'échelle microscopque, une structure plus fermée qu'un béton courant (grossissement x 5 000).

Nota

La norme NF EN 206-1 bétons (spécifications, performances, production et conformité) définit les bétons à haute résistance : « béton appartenant à une classe de résistance à la compression supérieure à C50/60, s'agissant de béton de masse volumique normale ou de béton lourd, et supérieure à LC 50/55, s'agissant de béton léger ».

3.2.2 - Formulation, constituants et essais

La recherche des hautes performances passe par la réduction de la porosité du béton durci, c'est-à-dire de son pourcentage de vides. En effet, les dimensions et les volumes des pores capillaires sont les principaux paramètres qui régissent les résistances mécaniques du béton et les propriétés de transfert déterminantes pour la durabilité.

L'optimisation de la formulation d'un BHP consiste à diminuer la porosité de la matrice cimentaire et à optimiser le squelette granulaire.



LES ÉTAPES DE LA FORMULATION

La formulation d'un BHP suit les trois principales étapes suivantes :

> Détermination d'une formule théorique prévisionnelle :

– sélection des constituants en fonction de l'expérience locale ;
– détermination des proportions des constituants ;
– optimisation du squelette granulaire.

> Optimisation du mélange en laboratoire :

– validation de la compatibilité ciment / adjuvant ;
– ajustement de la quantité de pâte et de l'adjuvantation ;
– vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
– analyse de la sensibilité de la formule aux variations des dosages des divers constituants ;
– analyse de la sensibilité de la formule aux conditions climatiques possibles lors de la mise en œuvre (température).

> Validation de la formule en centrale :

– vérification du comportement rhéologique du béton frais ;
– vérification des éventuelles spécifications complémentaires telle que la pompabilité ;
– vérification des caractéristiques du béton.

Nota

Des outils spécifiques de contrôle ont été développés pour faciliter la formulation des BHP : méthode des coulis AFREM, méthode MBE (Mortier de Béton Équivalent), Rhéomètre, logiciel BETONLAB.



L'OPTIMISATION DE LA FORMULATION D'UN BHP

Deux voies sont généralement associées pour optimiser la formulation d'un BHP.

> Défloculation des grains de ciments et réduction de la teneur en eau

L'emploi des superplastifiants permet une réduction de la teneur en eau du mélange à consistance égale (entraînant la suppression d'un volume important d'eau non mobilisée par l'hydratation du ciment). Les rapports E/C sont de l'ordre de 0,35 au lieu de 0,45 à 0,50 pour un béton usuel (soit une réduction de la teneur en eau de plus de 30 %).

Les superplastifiants s'opposent à la floculation des grains de ciment en suspension dans l'eau, ce qui augmente leur réactivité, facteur de résistance à court terme. Ils permettent une réduction sensible de l'eau de gâchage (une partie de l'eau n'est plus piégée dans les flocs de ciment) tout en garantissant une ouvrabilité satisfaisante, une amélioration de la fluidité et une diminution très importante de la porosité du béton à l'état durci.

> Optimisation du squelette et de l'empilement granulaire

Chaque classe granulaire est adaptée afin d'obtenir un mélange à très haute compacité (les éléments fins remplissant les espaces entre les plus gros granulats). Des mélanges optimums de grains (s'appuyant généralement sur quatre niveaux de taille de grain) permettent d'obtenir la porosité minimum du squelette granulaire.

Les performances des BHP peuvent encore être augmentées par l'optimisation du mélange granulaire grâce à l'ajout de particules ultrafines, le plus souvent à caractère pouzzolanique. Elles ont une action sur la granulométrie du mélange, en comblant les microvides intergranulaires et en densifiant l'interface pâte de ciment-granulat. Elles augmentent la compacité du mélange et améliorent sa rhéologie à l'état frais. Les ultrafines les plus utilisées sont les fumées de silice. Elles présentent également une réactivité avec la chaux libre, liée à leur caractère pouzzolanique ce qui accroît les résistances mécaniques.

Cette optimisation du squelette granulaire permet aussi de réduire la teneur en eau.



LES FUMÉES DE SILICE

La fumée de silice est un produit minéral amorphe obtenu essentiellement lors de la fabrication du silicium et de ses alliages.

Le silicium est obtenu par réduction du quartz en présence de carbone à 2 000 °C dans des fours à arc électrique.

Les fumées contiennent du monoxyde gazeux (SiO) qui s'oxyde et se condense en particules vitrifiées amorphes extrêmement fines.

Ces particules sont lisses et sphériques (100 000 billes de fumées recouvrent entièrement un grain de ciment).

Leur couleur est le plus souvent gris clair.

QUELQUES EXEMPLES DE FORMULATION POUR 1 m³ DE BHP

> PONT DE JOIGNY
sans fumée de silice

CEM I 52,5	450 kg
Granulat 6/20	1 027 kg
Sable 0/4	648 kg
Sablon	105 kg
Eau	160 l
Superplastifiant	11,25 kg
Retardateur	4,50 kg

> VIADUC DU CROZET
avec fumée de silice

CEM I 52,5 PMES	385 kg
Gravillon 5/12	363 kg
Gravier 12/20	694 kg
Sable 0/5	785 kg
Fumée de silice	31 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	1,2 %

> PONT DE JONCHE
avec fumée de silice

CEM I 52,5	420 kg
Fumée de silice	35 kg
Gravillon 6/10	250 kg
Gravillon 10/14	730 kg
Sable 0/4	660 kg
Sablon 0/1	140 kg
Eau	152 l
Superplastifiant	1,73 %

> PONT RAIL TGV MÉDITERRANÉE
sans fumée de silice

CEM I 52,5 R CP2	425 kg
Gravillon 12,5/20	655 kg
Gravillon 4/12,5	500 kg
Sable 0/4	760 kg
Eau	140 l
Superplastifiant	1,4 %

3.2.3 - Spécifications sur les constituants

Les constituants du BHP font l'objet des principales spécifications suivantes.

- **Ciments :** conformes à la norme NF EN 197-1 de types CEM I ou CEM II ou CEM III et de classes de résistance conseillées 42,5 ou 52,5 (N ou R).
- **Granulats :** conformes à la norme NF EN 12620 « Granulats pour bétons » et à la norme XP P 18-545 (article 10 : « granulats pour bétons hydrauliques »).
- **Additions :** conformes aux diverses normes en vigueur – cendres volantes silico-alumineuses, laitiers de haut fourneau, fillers calcaires, filler siliceux, éventuellement ultrafines (fumées de silice).
- **Adjuvants :** plastifiants réducteur d'eau et superplastifiants haut réducteur d'eau conformes à la norme NF EN 934-2.

3.2.4 - Avancées récentes

Les recherches menées, cette dernière décennie, en particulier dans le cadre du PROJET NATIONAL BHP 2 000 ont permis :
– la validation, la confirmation et l'appréciation de la durabilité des BHP (mise au point d'essai de mesure de la porosité, de la profondeur de carbonatation, de la pénétration des chlorures, etc.) ;
– la mise au point de nouveaux constituants adaptés aux BHP (fumées de silice, adjuvants de nouvelle génération, etc.) ;
– l'évolution dans la méthodologie et la maîtrise des formulations des BHP.

Les résultats de ces recherches se sont concrétisés par :
– la reconnaissance officielle des BHP dans les règles de calcul BAEL et BPEL (ces règles couvrent l'usage des BHP jusqu'à des résistances atteignant 80 MPa) puis actuellement dans les normes européennes de dimensionnement (les EUROCODES) ; ces nouvelles règles permettent de prendre en compte les propriétés mécaniques des BHP dans la conception et le calcul des structures ;
– la prise en compte des BHP dans le Fascicule 65 A ;
– la mise à disposition et la généralisation des BHP dans le réseau des centrales BPE ;
– la réalisation très courante, dans les usines de préfabrication, de produits préfabriqués en béton (en BHP armé ou précontraint).

> ***Nota***
> *L'additif au fascicule 65 A « Exécution des ouvrages de Génie Civil en béton armé ou en béton précontraint » précise, chapitre 2, des recommandations sur le choix des composants, sur les techniques de fabrication et de mise en œuvre des BHP.*

3.2.5 - Propriétés physico-chimiques et mécaniques des BHP

Les diverses propriétés des BHP découlent de leur faible porosité, gage de durabilité.

Résistances mécaniques

Les BHP présentent des résistances en compression importantes aux jeunes âges, compte tenu de la rapidité de la cinétique de montée en résistance, et très élevées à long terme (avec une montée en résistance se poursuivant au-delà de 28 jours).

Un BHP de 60 MPa à 28 jours peut offrir des résistances mécaniques de 15 MPa à 24 heures, voire davantage, et 40 MPa à 7 jours. Le gain est aussi important en termes de résistance en traction ou au cisaillement.

> ***Nota***
> *Les règles BAEL définissent la résistance caractéristique à la traction, à partir de la résistance à la compression, par les formules suivantes :*
> $f_{tj} = 0{,}6 + 0{,}06\, f_{cj}$ *si* $f_{cj} < 60$ *MPa*
> $f_{tj} = 0{,}275\, f_{cj}^{2/3}$ *si* $60 \leq f_{cj} \leq 80$ *MPa*

Module d'élasticité

Le module d'élasticité des BHP est supérieur à celui des bétons traditionnels.

> ***Nota***
> *Les règles BAEL fournissent une expression qui permet d'évaluer la valeur du module Ei, en fonction de la résistance à la compression par la formule :*
> $E_{ij} = 11\,000\, f_{cj}^{1/3}$

Retrait

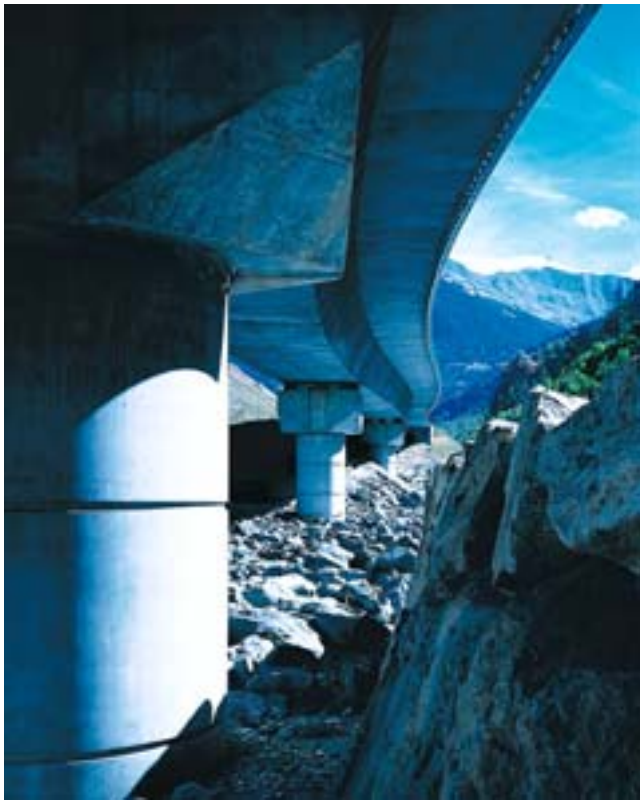
Le retrait total du BHP est globalement identique à celui d'un béton traditionnel mais avec une cinétique différente (il se produit plus tôt et se développe principalement pendant les premiers jours après le coulage).

Le retrait de dessiccation à l'état durci est plus faible compte tenu du faible dosage en eau. Le retrait endogène (ou d'autodessication), compte tenu de la finesse de la microstructure et de la forte réduction du rapport E/C, est d'un coefficient plus élevé (150 à 250 x 10^{-6}) pour un BHP que pour un béton traditionnel (60 x 10^{-6}). Le retrait d'autodessication est d'autant plus précoce et élevé que le rapport E/C est faible.

> ***Nota***
> *Les BHP sont susceptibles de dessiccation précoce à l'état frais.* ***Il est donc indispensable de mettre en œuvre immédiatement*** *après le bétonnage* ***une cure adaptée et soignée.***

Fluage

Les BHP présentent un fluage (déformation différée sous chargement permanent) plus faible que les bétons traditionnels (surtout avec des formulations à base de fumées de silice). La cinétique de fluage propre est très rapide (le fluage est accéléré et se manifeste dés les jeunes âges du béton) et se stabilise plus vite. Le fluage de dessiccation est très faible. Le fluage est d'autant plus faible que la résistance en compression est plus élevée.



> ***Nota***
> *Dans les règles BAEL, le coefficient de fluage à prendre en compte est fonction de la présence de fumées de silice. Il est égal à :*
> *– 0,8 pour les BHP avec fumée de silice ;*
> *– 1,5 pour les BHP sans fumée de silice.*
> *Ce coefficient de fluage est égal à 2 pour les bétons traditionnels.*

Dans les structures précontraintes, l'utilisation de BHP permet de réduire les pertes de précontrainte associées aux déformations différées du béton. Ce faible fluage permet d'augmenter l'efficacité de la précontrainte et de faciliter le contrôle géométrique des ouvrages.

L'utilisation de BHP avec fumée de silice conduit donc à des réductions de déformations différées et des redistributions d'efforts plus faibles.

Imperméabilité

Leur faible porosité capillaire confère aux BHP une très faible perméabilité.

Résistance aux agents agressifs

La faible perméabilité des BHP leur confère une bonne résistance à la pénétration et au transfert dans la masse du béton des agents agressifs en phase gazeuse ou liquide (eaux de mer, eaux sulfatées, solutions acides, dioxyde de carbone, etc.).

Nota

Cette résistance des BHP aux agressions chimiques est valorisée, en particulier, dans les ouvrages d'assainissement et les ouvrages situés dans les milieux agricoles ou industriels.

Migration des ions chlorure

Le Projet national BHP 2 000 a clairement démontré que la résistance des BHP à la migration des ions chlorures est largement supérieure à celle des bétons courants, grâce à sa microstructure plus dense. C'est un des points forts du BHP vis-à-vis du risque de corrosion des armatures.

Tenue aux attaques gel/dégel

Les BHP, correctement formulés, résistent aux cycles gel/dégel grâce à leur forte compacité et à leur résistance mécanique élevée. Ce bon comportement des BHP aux cycles gel/dégel a été mis en évidence dans le cadre du projet national BHP 2 000.

Le guide LCPC « Recommandations pour la durabilité des bétons durcis au gel » spécifie, chapitre 3.2, les principales recommandations spécifiques à l'élaboration des BHP et explicite la démarche à suivre pour formuler des BHP résistant au gel sévère et à l'écaillage et satisfaire la durabilité aux cycles gel-dégel en présence ou non de sels de déverglaçage.

La faible perméabilité des BHP et le faible rapport E/C favorisent une résistance plus importante aux risques d'écaillage en présence de sels de déverglaçage.

Il est possible de formuler des BHP qui résistent bien aux cycles gel/dégel et à l'écaillage sans ajouts d'entraîneur d'air. Lorsque le béton doit résister à un gel sévère (forte saturation d'eau), l'utilisation d'un entraîneur d'air est généralement nécessaire si le E/C est supérieur à 0,32.

Nota

La tenue du béton durci aux effets du gel/dégel est validée par trois essais de performance :
– essai de gel dans l'eau – dégel dans l'air (norme NF P 18-425 pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation modérée ;
– essai de gel dans l'eau – dégel dans l'eau (norme NF P 18-424) pour les environnements de gel sévère et des bétons à saturation en eau élevée ;
– essai d'écaillage des surfaces de béton durci exposées au gel en présence de sels de déverglaçage (norme NF P 18-420).
Les deux premiers essais permettent de justifier la résistance au gel interne, le troisième, la résistance à la dégradation de surface (écaillage).
Les recommandations du LCPC concernent les bétons de résistances caractéristiques à 28 jours supérieures ou égales à 50 MPa formulés avec ou sans entraîneur d'air. Ces recommandations distinguent deux classes de BHP en fonction du rapport E/C :
– classe 1 $E/C \geq 0{,}32$;
– classe 2 $E/C < 0{,}32$;
et deux types de formulations :
– béton formulé sans entraîneur d'air ;
– béton formulé avec entraîneur d'air.

Tenue au feu

L'analyse du comportement au feu du BHP a fait l'objet d'un important programme de recherche dans le cadre du Projet National BHP 2000, visant à modéliser, en particulier, l'écaillage et les évolutions des performances mécaniques à très hautes températures et étudier les solutions techniques permettant de réduire les risques d'éclatement.

Ces essais ont permis de mettre en évidence l'intérêt de l'introduction de fibres de polypropylène (à des dosages de quelques kg/m^3) pour réduire de façon efficace le risque d'écaillage des BHP (les fibres en fondant, vers 170 °C, constituent un réseau connecté de canaux rendant le matériau beaucoup plus perméable, ce qui permet l'évacuation de la vapeur).

Carbonatation

De nombreuses études ont démontré que la durabilité des BHP vis-à-vis de la carbonatation est très nettement supérieure à celle d'un béton traditionnel. En effet, le réseau poreux, peu connecté

limite la diffusion du gaz carbonique au sein de la matrice cimentaire. La faible porosité initiale favorise le colmatage des pores lié à la formation des cristaux de calcite. La progression de la carbonatation en profondeur est réduite, ce qui assure une meilleure protection des armatures.

Adhérence acier-béton

La grande résistance mécanique du BHP et sa microstructure interne permettent de mobiliser une liaison supérieure entre les armatures en acier et le BHP et donc d'améliorer les qualités d'adhérence, ce qui permet une réduction des longueurs d'ancrage et de scellement.

Réduction des flèches et des déformations des structures

Plusieurs propriétés, de nature soit rhéologique, soit mécanique, permettent de réduire les flèches et les déformations dans les structures et les dalles en BHP : résistance à la traction du béton plus grande, module d'élasticité plus élevé, fluage plus faible et adhérence acier-béton supérieure.

Propriétés thermiques

Les propriétés thermiques des BHP, telles que conductivité, diffusité, chaleur spécifique et coefficient de dilatation ne diffèrent pas sensiblement de celles des bétons traditionnels.

3.2.6 - Performances des BHP

Des propriétés exceptionnelles à l'état frais

Les BHP présentent une fluidité, une ouvrabilité, une aptitude au pompage et un maintien de la plasticité dans le temps à l'état frais qui apportent de nombreux avantages lors de la mise en œuvre :
– garantie d'un bon remplissage des moules et des coffrages et de l'enrobage parfait des armatures ;
– amélioration de l'écoulement du béton, en particulier dans les zones très ferraillées ;
– réduction du délai d'exécution de l'ouvrage et gain de productivité ;
– exécution de bétonnages complexes dans des conditions d'accès difficiles.

Le BHP présente aussi :
– une bonne stabilité à l'état frais, ce qui garantit l'absence de ségrégation ;
– une faible viscosité qui autorise le pompage sur de longues distances.

Des performances élevées aux jeunes âges

Les caractéristiques physico-chimiques et la cinétique spécifique de durcissement des BHP, leur confèrent des résistances mécaniques importantes aux jeunes âges (par exemple, 15 MPa à 12 heures ou 30 MPa à 24 heures), ce qui autorise :
– des décintrements et des décoffrages rapides ;

Ordre de grandeur des principales caractéristiques des BHP

		BHP sans fumée de silice	***BHP avec fumée de silice***
Résistance en MPa			
Compression sur cylindres	28 jours	60	80-90
	1 jour	25	30
	7 jours	50	75
Résistance en traction en MPa (28 jours)		4,2	5,5
Module d'élasticité (28 jours)		42000	52000
Coefficient de fluage		1,5	0,8
$E_{eff}/Liant_{eq}$		0,38	0,34
Dosage en ciment en kg/m³		400	420
Teneur en fumée de silice (de % de ciment)		–	8

Tableau extrait du guide pratique IREX à l'attention des bureaux d'études pour l'application des règles BAEL aux BHP.



Les réponses des BHP à des contraintes spécifiques		
Contraintes	***Performances des BHP***	***Commentaires***
Recherche de gain de productivité	Maniabilité	Mise en œuvre plus facile avec des ferraillages denses
	Pompabilité	
	Résistance aux jeunes âges	Accélération de la rotation des coffrages et des mises en tension de la précontrainte
Accroissement de la durabilité	Forte compacité	Matériau particulièrement adapté pour des ouvrages soumis à des conditions climatiques rigoureuses, des agressions chimiques ou à des ambiances marines
	Faible porosité	
Construire des structures plus légères et plus élancées	Performances mécaniques	Une nouvelle liberté de conception pour les architectes et les ingénieurs

– l'optimisation des cycles de coffrage/décoffrage et des séquences de production ;
– des délais avant mise en tension des armatures de précontrainte raccourcis ;
– la fabrication d'éléments préfabriqués, dans certains cas, sans utilisation de traitement thermique.

Il en résulte une simplification et une approche différente de l'organisation des chantiers, une augmentation de la productivité et des gains significatifs sur les délais de construction des ouvrages.

Des résistances mécaniques importantes à long terme

Les BHP offrent des performances mécaniques élevées à long terme en compression, traction, flexion et cisaillement. Ces performances se traduisent en particulier par :
– une résistance importante aux agents agressifs ;
– un faible risque de corrosion des armatures ;
– une forte résistance aux cycles de gel/dégel ;
– une faible perméabilité ;
– une meilleure adhérence acier/béton ;
– un fluage inférieur à celui des bétons traditionnels ;
– une augmentation du module d'élasticité ;
– une diminution des sections de béton.

Ces gains de performance se traduisent par un coût d'entretien réduit.

3.2.7 - Association de bétons et d'armatures à hautes performances

Une étude a été menée dans le cadre du PROJET NATIONAL BHP 2000, elle était destinée à valider les potentialités d'association des Bétons à Hautes Performances (BHP) et des armatures à haute limite élastique (AHP). Elle a permis de justifier la possibilité et l'intérêt de dimensionner des ouvrages en associant BHP et AHP.

Exploitation des performances des BHP		
Acteurs	***Performances***	***Objectifs***
Architecte	Pérennité architecturale	Création de nouvelles formes et de nouveaux ouvrages
		Qualité et homogénéité des parements
Ingénieur d'études	Résistances mécaniques à long terme	Gain de dimensionnement
		Allégement des ouvrages (tablier et fondations)
		Structures plus élancées
		Augmentation des portées
Ingénieur Méthodes	Rhéologie	Exploitation de la rhéologie aux jeunes âges
	Propriétés à l'état frais	Optimisation des cycles de construction et de l'organisation des chantiers
	Performances aux jeunes âges	Décoffrage et mise en tension rapides
		Pompabilité
		Facilité de mise en œuvre
		Optimisation des cadences
Responsable du chantier	Propriétés à l'état frais	Recherche de productivité
		Réduction des délais d'exécution
	Performances aux jeunes âges	Réduction des coûts de main d'œuvre
Préfabricant	Durabilité Vitesse de durcissement Fluage	Augmentation des cadences de production Réalisation d'éléments plus durables Application de la précontrainte plus tôt Réalisation de produits plus fins, plus élancées, plus légers
Maître d'œuvre ***Maître d'ouvrage***	Durabilité	Augmentation de la durée de service de l'ouvrage
	Réduction de l'entretien et de la maintenance	Réduction du coût global de l'ouvrage
		Économie de maintenance
Usager	Réduction de l'entretien et de la maintenance	Faibles perturbations sur la circulation lors des travaux d'entretien
		Impact environnemental (réduction de matière et économie de ressources naturelles)

L'association de bétons à Hautes performances et d'armatures à hautes performances offre de nombreux atouts :

– réduction des quantités d'armatures (section, diamètre, nombre) ;
– amélioration de l'adhérence acier-béton ;
– réduction des sections de coffrage ;
– amélioration des conditions de bétonnage (ferraillage simplifié) ;
– gain de main d'œuvre ;
– plus grande durabilité et moindre déformabilité des structures ;
– conception de structures plus élancées et plus légères (la rigidité des structures est augmentée) ;
– augmentation de la résistance à la fissuration et à la ruine.

Les lois de comportement des éléments de structure en BHP armés avec des AHP sont similaires à celles du béton armé classique (adhérence, ouverture des fissures et espacement), les règles de dimensionnement de l'EUROCODE 2 peuvent donc être adaptées aux BA-HP.

Les études ont démontré qu'il convient pour optimiser les performances du matériau d'associer des couples adaptés de BHP-AHP (Béton B60 avec armatures Fe E 800, par exemple).

3.2.8 - Atouts des BHP

Les Bétons à Hautes Performances offrent des atouts qui ont été démontrés par des campagnes d'essais en particulier dans le cadre du Projet National BHP 2000, puis validés et confirmés sur de très nombreux chantiers.

3.2.9 - Analyse économique

L'analyse des ouvrages en BHP, selon une approche en coût global, basée sur la valorisation de ses atouts permet de valider son intérêt économique

3.2.10 - Principaux domaines d'applications et principales références

Un nombre croissant d'applications à caractère exceptionnel ou plus modeste ont permis l'exploration progressive des diverses potentialités offertes par les Bétons à Hautes Performances et mis en lumière leurs nombreux atouts.

Structures coulées en place

La formulation et la fabrication de bétons dont la résistance caractéristique à 28 jours atteint 60 MPa voire 80 MPa est aujourd'hui de pratique courante en France et n'est plus du domaine expérimental. De nombreux ouvrages ont été exécutés en BHP ces dernières années.

Cette « banalisation » des BHP est rendue possible par la disponibilité du produit au sein du réseau des centrales BPE à peu près partout en France. Ces BHP sont en général formulés avec des granulats

TRADUCTION DES PERFORMANCES MÉCANIQUES DES BHP

> **Résistances en traction supérieures**, ce qui permet de limiter la précontrainte et d'amincir la section transversale en béton.

> **Performances en flexion** qui se traduisent par une augmentation de la rigidité en flexion et qui permettent un allongement des portées et offrent des gains importants de poids propre, générant des économies de fondations.

> **Fluage inférieur** à celui des bétons ordinaires et évolution plus rapide. Il en résulte des redistributions d'efforts plus faibles au cours de la durée du chantier et des premières années de mise en service et des déformations des structures moindres, ce qui autorise la conception de structures plus élancées et permet d'assurer un meilleur contrôle géométrique des ouvrages et une meilleure efficacité de la précontrainte.
Les faibles déformations différées permettent de réduire les pertes de précontrainte.

> **Réduction de l'ouverture de fissures**. L'emploi de BHP permet de réduire l'ouverture des fissures à contraintes égales dans les armatures et donc d'augmenter la résistance à la fissuration et à la ruine des structures.

> **Meilleure adhérence acier béton**, d'où une réduction sensible des longueurs de recouvrement, de scellement et d'ancrage des armatures et une simplification des dispositions constructives et des schémas de ferraillage.

> **Augmentation des valeurs de contrainte de tractions admissibles** ce qui permet de réduire les sections d'armatures.

> **Majoration des contraintes de cisaillement admissibles.** Il en résulte la possibilité de réduire, par exemple, les épaisseurs des âmes des poutres en BHP sans augmentation corrélative des armatures transversales.

> **Réduction des épaisseurs d'enrobage** compte tenu des faibles porosités et sensibilités aux agents agressifs des BHP.

Analyse économique des BHP		
Atouts	***Surcout***	***Gain***
Performances du béton frais	Superplastifiant	Facilité de mise en œuvre Mains-d'œuvre réduite
Performances aux jeunes âges	Types de ciment	Décoffrage rapide
	Cure soignée	Mise en précontrainte accélérée
		Simplification des méthodes de réalisation
Performances mécaniques	Dosage en ciment	Gain de matière (structure et fondation)
Optimisation des structures	_	Délais de réalisation plus courts
		Productivité du chantier
Durabilité	Fumées de silice	Durée de service de l'ouvrage
Réduction des frais d'entretien et de maintenance	Optimisation de la formulation	Frais de maintenance
		Pas de corrosion d'armature
Esthétisme et pérennité architecturale	Granulats spécifiques	Intégration de l'ouvrage dans son environnement

locaux. Les centrales à béton sont équipées des automatismes, des process de fabrication, des procédés de dosages et des procédures de contrôle rigoureuses assurant la reproductibilité des caractéristiques et la maîtrise de la fabrication des BHP.

Le réseau BPE a fait la preuve depuis plusieurs années à l'occasion de nombreux chantiers de sa pleine maîtrise industrielle des BHP et de sa capacité à livrer tous types de chantier.

> ***Nota***
> *Le malaxage doit généralement être prolongé par rapport à celui d'un béton courant. Le BHP requiert un niveau de qualité de fabrication important compte tenu de la sensibilité de son comportement aux variations de proportion des constituants, en particulier du dosage en eau.*

Produits préfabriqués en béton

Le BHP est utilisé dans l'industrie du béton depuis de nombreuses années pour la réalisation de multiples éléments préfabriqués en usine. L'industrie des produits préfabriqués en béton a su, depuis son origine, produire des bétons à hautes performances grâce à ses techniques spécifiques et ses conditions industrielles de production. Elle dispose de moyens et de techniques bien adaptés pour produire des éléments avec des performances mécaniques et une durabilité encore améliorées en particulier grâce à l'association d'outils et de méthodes de production performants avec les progrès réalisés ces dernières années dans l'optimisation des matériaux tels que les BHP.

Le développement des BHP présente un grand intérêt pour l'industrie du béton. Ces matériaux permettent de proposer des produits nouveaux encore plus performants (allégements et réductions de sections) et d'envisager l'accès à de nouveaux marchés grâce à l'amélioration des performances.

Parmi les plus usuels, on peut citer les poutres et les poutrelles précontraintes pour plancher qui grâce au BHP ont leur section diminuée de 30 %, ainsi que les dalles alvéolées, qui pour une épaisseur n'excédant pas 25 cm permettent des portées de l'ordre de 15 m, ainsi que les tuyaux d'assainissement et les poutres PRAD pour la réalisation d'ouvrages routiers ou ferroviaires et de très nombreux produits précontraints par fils adhérents.

Les BHP permettent de précontraindre les produits à des contraintes plus élevées et donc d'optimiser les sections. Ils permettent aussi, pour la plupart des produits, de diminuer la durée des cycles de fabrication en autorisant des décoffrages rapides et des mises en précontrainte accélérée et de concevoir des éléments plus légers donc plus faciles à mettre en œuvre ou à poids équivalent de portées



plus importantes. La diminution des déformations différées (retrait et fluage) est aussi un avantage déterminant en préfabrication. Ils autorisent la réalisation de produits élancés offrant aux architectes de nouvelles possibilités de création. Les usines de produits préfabriqués en béton utilisent régulièrement pour la fabrication de nombreux produits, des BHP dont la résistance à la compression dépasse 60 MPa et pouvant atteindre jusqu'à 100 MPa.

La réduction des sections, consécutive aux meilleures caractéristiques mécaniques du matériau, permet de diminuer le poids des éléments et par suite les coûts de manutention, de transport et de mise en place.

Sur le plan environnemental, les BHP s'insèrent complètement dans la démarche visant à utiliser encore mieux les ressources en énergie et en matières premières.

3.2.11 - Documents de références

Synthèse des travaux du Projet national BHP 2000 sur les bétons à hautes performances.

Propriétés du BHP valorisées en fonction du type de structures

Type de Structure	***Propriétés valorisées***					
	Ouvrabilité	***Résistance à court terme***	***Résistance mécanique***	***Tenue à l'abrasion***	***Déformations différées***	***Durabilité***
Ponts routiers, Autoroutiers, Ferroviaires	X	X	X		X	X
Tunnels Travaux Souterrains		X	X			X
Assainissement	X			X		X
Préfabrication	X	X	X		X	X
Bâtiments de hauteur	X	X	X			
Ouvrage en site maritime						X

3.3 Les bétons autoplaçants

Les maîtres d'ouvrage, architectes, ingénieurs, entrepreneurs du BTP, fabricants de béton et préfabricants ont toujours recherché un béton permettant :
– une mise en place aisée ;
– un bon remplissage des coffrages et des moules ;
– un parfait enrobage des armatures ;
– une forte compacité.
Avec comme principaux objectifs :
– la suppression des opérations coûteuses en main d'œuvre (vibration, tirage à la règle, ragréage, etc.) ;
– l'obtention d'une qualité, d'une régularité et d'une durabilité des bétons encore plus grandes ;
– le coulage facilité de structures complexes et souvent fortement ferraillées ;
– l'allongement des temps d'ouvrabilité ;
– l'amélioration de la qualité esthétique des parements ;
– l'augmentation des cadences de production et de la productivité des chantiers et des usines ;
– la réduction de la pénibilité des tâches des ouvriers ;
– la réduction des nuisances sonores sur les chantiers ;
– l'obtention d'une parfaite planéité des hourdis et des dalles ;
– la fabrication de ces bétons dans la majorité des centrales du réseau BPE et des usines de préfabrication à partir de matériaux courants disponibles localement ;
– la diminution des reprises de bétonnage.
Ces objectifs doivent être atteints en conservant à terme pour ce béton des performances comparables à celles d'un béton traditionnel de même caractéristiques.

L'expertise acquise lors des travaux de recherche sur les BHP et la maîtrise croissante des nouveaux superplastifiants ont permis la mise au point de nouveaux bétons : les BÉTONS AUTOPLACANTS (BAP) qui répondent largement à ces exigences.

Les recherches effectuées ces dernières années ont créé les conditions de réalisation et de reproductibilité d'un béton homogène, très fluide, aisé à mettre en œuvre sans vibration, ne ségrégeant pas et présentant des propriétés de résistance et de durabilité comparables à celles des bétons traditionnels. Cette hyperfluidité du béton a été rendue possible par l'arrivée sur le marché des dernières générations d'adjuvants superplastifiants (qui augmentent considérablement la dispersion des grains de ciment).





Photos : Holcim Bétons

En France, les premières applications des bétons autoplaçants datent de 1995. Après une phase de recherche et dix années de développement régulier, les BAP ont été progressivement testés et adoptés par les entreprises et par les usines de préfabrication pour la réalisation de bâtiments ou de structure de génie civil. Les nombreux chantiers de bâtiment (immeubles, hôpitaux et lycées réalisés en BAP) ont permis de confirmer les performances de ces nouveaux bétons et de valider les techniques de mise en œuvre.





Les BAP se caractérisent par leur fluidité, un faible ressuage, leur pompablilité ainsi qu'un bon maintien de leur ouvrabilité.

Les centaines d'opérations réussies, réalisées, tant au sein des grands groupes que des petites et moyennes entreprises, voire sur de très petits chantiers, montrent combien ce matériau bouleverse le champ de la construction en béton. Les BAP font désormais partie des formulations courantes proposées par la majorité des centrales de Béton Prêt à l'Emploi. L'offre couvre toute la gamme des performances mécaniques (des résistances courantes à très élevées), et permettent d'obtenir une très grande variété de textures, de teintes et d'aspect de surface.

Les usines de préfabrication ont développé de nouveaux process de fabrication pour bénéficier des avantages de ce matériau. De nombreux produits préfabriqués sont actuellement couramment réalisés en BAP aussi bien en bâtiment qu'en travaux publics :

- panneaux et voiles verticaux : panneaux de façade, encadrements de portes et fenêtres, encadrements de baies ;
- éléments de structure : poteaux précontraints, poutres, poutrelles, poutrelles treillis pour plancher béton, dalles, appuis, pré linteaux, caissons précontraints, longrines ;
- escaliers ;
- assainissement : cunettes, fond de regard, cuves et citernes ;
- éléments pour le génie civil : bordures, glissières de sécurité, chambres d'éclairage public, gradins, fossés ;
- éléments pour piscines, caveaux, socles de machines outils, buses rectangulaires, acrotères, corniches, lucarnes.

3.3.1 - Propriétés des BAP

Les bétons autoplaçants (BAP) sont des bétons très fluides, qui se mettent en place sans vibration. Lors du coulage dans un coffrage, le serrage d'un BAP est assuré sous le simple effet de la gravité. Grâce à leur formulation, ils offrent des caractéristiques exceptionnelles d'écoulement et de remplissage des coffrages tout en résistant parfaitement à la ségrégation. Homogènes et stables, ils présentent des résistances et une durabilité analogues à celles des bétons traditionnels dont ils se différencient par leurs propriétés à l'état frais. La fluidité du BAP permet sa mise en place aisée par pompage.

> ***Nota***
> *En usine de préfabrication, une très légère vibration peut être appliquée, l'essentiel de la compaction s'effectuant sous le seul effet gravitaire.*

L'atout essentiel des BAP, la mise en œuvre sans vibration génère toute une chaîne d'avantages : réduction des délais, amélioration de la productivité, réduction des matériels de levage, qualité des parements accrue, bétonnage aisé de pièces de très grande hauteur ou très armées, réduction considérable de la pénibilité pour les ouvriers, gain de sécurité.

Les BAP sont formulés de manière à obtenir le compromis optimal entre fluidité et résistance à la ségrégation et au ressuage. Ils offrent une plus grande qualité esthétique des parements.

Les BAP sont utilisés aussi bien coulés en place sur chantier, livrés à partir de centrales de béton prêt à l'emploi et mis en œuvre généralement par pompage, qu'en usine de préfabrication d'éléments en béton. Ils présentent à l'état durci des performances et des durabilités analogues à celles des bétons traditionnels mis en œuvre par vibration. Leur durée de vie est au moins équivalente à celle des bétons traditionnels.

Les prescriptions et les règles de conception et de dimensionnement des structures en béton sont applicables au BAP, ce qui permet de les utiliser en lieu et place de bétons de même caractéristiques mécaniques.

Toute la gamme de résistance des bétons traditionnels peut-être obtenue en autoplaçant, en particulier de C 25/30 à C 80/95.

3.3.2 - Principe de formulation des BAP

Les BAP doivent présenter une grande fluidité et pouvoir s'écouler avec un débit suffisant sans apport d'énergie externe (vibration) à travers des zones confinées (armatures) en présence d'obstacles ou se mettre en place dans des coffrages de grande hauteur. Ils doivent s'opposer à la ségrégation « dynamique » (en phase de coulage) et à la ségrégation « statique » (une fois en place) afin de garantir l'homogénéité des caractéristiques et de ne pas présenter de ressuage ou de tassement. Ils doivent aussi être pompables.

Pour ce faire la formulation des BAP repose sur trois critères.

• Fluidification de la pâte : elle est obtenue sans ajout d'eau par utilisation de superplastifiants à fort pouvoir défloculant.

• Limitation des frottements entre les granulats pour favoriser l'écoulement : la taille des granulats qui peuvent être concassés ou roulés est généralement plus faible ; le volume de pâte et la quantité de fines sont plus importants que pour un béton mis en œuvre par vibration.

• Stabilisation du mélange pour éviter les risques de ségrégation : elle est obtenue par l'emploi d'agents de viscosité et l'incorporation d'additions (fillers, cendres volantes, laitier moulu, fumées de silice).

La formulation des BAP fait appel à :

– des superplastifiants pour obtenir la fluidité souhaitée et quelques fois des agents de viscosité pour maîtriser la ségrégation et le ressuage ;
– une quantité de fines (ciments, fillers calcaires, cendres volantes) élevée pour assurer une bonne maniabilité tout en limitant les risques de ségrégation et de ressuage (~500 kg/m³) ;
– un volume de pâte élevé (350 à 400 l/m³),
– un faible volume de gravillons afin d'éviter le « blocage du béton » dans les zones confinées (rapport gravillon/sable de l'ordre de 1 voire inférieur). Les granulats ont en général un D_{max} compris entre 10 et 16 mm afin d'améliorer l'écoulement ;
– du ciment (dosage à optimiser pour obtenir les performances souhaitées) ;
– un rapport E/C faible et un dosage en eau limité ;
– éventuellement un agent entraîneur d'air pour assurer la protection contre les effets du gel-dégel.

L'optimisation du squelette granulaire est indispensable pour obtenir les caractéristiques nécessaires à la fluidité et à l'écoulement en milieu confiné.

> ***Nota***
> *Les retraits et fluage des BAP sont analogues à ceux des bétons traditionnels.*

3.3.3 - Fabrication et transport

La formulation des BAP plus pointue que celles des bétons traditionnels, nécessite la mise en place de procédures de fabrication et de contrôles adaptées.

La plupart des malaxeurs peuvent fabriquer des BAP ; le temps de malaxage est toutefois légèrement plus long que pour un béton classique. Il faut que le mélange, riche en éléments fins et en adjuvants,

soit le plus homogène possible. Certaines formules peuvent nécessiter des séquences de malaxage spécifiques (ordre d'introduction des constituants dans le malaxeur, temporisation, temps de malaxage adaptés…)

L'un des points les plus importants de la fabrication est le contrôle strict de la teneur en eau du mélange en tenant compte de façon permanente de celle des granulats. Un contrôle renforcé des constituants doit être mis en place tout au long de la fabrication afin de maintenir la régularité de l'ensemble des performances.

L'hyperfluidité du béton conduit, à prendre des dispositions spécifiques pour éviter des déversements et à adapter l'ouvrabilité au temps de transport et de mise en œuvre.

3.3.4 - Mise en œuvre des BAP sur chantier

D'une manière générale les contraintes de mise en œuvre des BAP sont nettement plus faibles que celles des bétons mis en œuvre par vibration, grâce à leur facilité de coulage sur de longues distances et de grandes hauteurs.



Les propriétés d'écoulement des BAP donnent lieu à la mise en place de nouvelles procédures de remplissage des coffrages. Les caractéristiques du BAP autorisent des cheminements horizontaux importants. Ils peuvent être mis en œuvre, soit de façon traditionnelle à la benne à manchette, soit par pompage (en tête ou en pied de coffrage). Le pompage permet une mise en œuvre plus rapide du béton. L'extrême fluidité des BAP nécessite de soigner particulièrement l'étanchéité des coffrages. Il est important de limiter leur hauteur de chute dans les coffrages afin d'éviter toute ségrégation en amenant le bas de la manchette en limite de la zone de bétonnage.

Le coffrage doit être rigide, étanche et résistant (éventuellement renforcé pour résister à la pression en pied de coffrage). Les produits démoulants doivent être parfaitement adaptés. La hauteur du coulage doit être compatible avec la tenue du coffrage à la poussée du béton. Des essais grandeur nature ont été réalisés dans le cadre du Projet national PN BAP (voir le paragraphe 3.3.11) pour analyser le comportement réel des outils coffrants face à la pression exercée par le béton autoplaçant en fonction de la vitesse de bétonnage et la hauteur des coffrages. Ils ont permis de définir des recommandations.

En usage courant (voile de 2,8 m de hauteur), la poussée lors du coulage ne dépasse pas les limites de résistance des coffrages. Il convient d'équilibrer les pressions de part et d'autres des ouvertures. Pour des voiles de grande hauteur, quelques précautions particulières doivent être prises (il faut adapter par exemple la vitesse de bétonnage).

Les BAP exercent, compte tenu de leur fluidité et leur long maintien de rhéologie, des pressions hydrostatiques plus importantes sur les coffrages lorsque les vitesses de bétonnage sont élevées. Il convient donc de soigner la fixation des réservations, des armatures, des fourreaux et des boîtiers et la stabilité des coffrages pour résister à la pression hydrostatique. Dans certains cas (voile de très grande hauteur avec de très nombreuses ouvertures), le coffrage doit être spécifiquement étudié.

Une cure efficace doit être mise en œuvre le plus tôt possible après la fin du bétonnage, particulièrement pour les surfaces horizontales afin d'éviter toute évaporation précoce d'eau. Les BAP ne nécessitent pas d'opération de surfaçage pour les

applications horizontales. Leurs performances à l'état frais autorisent leur pompage sur de longues distances et de nouvelles possibilités de mise en œuvre.

Mise en œuvre à la benne à manchette traditionnelle

Le béton est mis en œuvre par le haut du coffrage au moyen d'une goulotte. La manche est glissée dans le coffrage pour réduire la hauteur de chute. Il est nécessaire d'adapter les diamètres de la manche sous la benne par rapport au béton traditionnel (60 à 80 mm au lieu de 150 à 200 mm) pour qu'elle puisse être introduite entre les armatures. Pour maîtriser l'esthétique des parements, il convient de limiter au maximum la hauteur de chute.



Mise en œuvre par pompage en pied de coffrage : pompage « source »

Cette méthode est adaptée en particulier pour les éléments verticaux de grande hauteur. Elle supprime toute intervention en partie haute des coffrages.

Mise en œuvre par pompage en tête de coffrage avec tube plongeur

Le tube plongeur doit être suffisamment introduit dans le coffrage pour limiter au maximum la hauteur de chute. Cette méthode est aussi adaptée au bétonnage d'éléments verticaux.

Comme pour tous les bétons, il convient lors des phases de bétonnage de prendre en compte les conditions climatiques et de mettre en œuvre des dispositions particulières en dehors de la plage de températures usuelles (5 °C à 30 °C).

3.3.5 - Domaines d'utilisation privilégiés des BAP

Les BAP sont utilisables aussi bien pour la réalisation d'ouvrages horizontaux que verticaux, sur tous les types de chantier, de bâtiments ou de génie civil et pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués en béton. La plupart des ouvrages peuvent être réalisés en BAP (voiles, poteaux, piles, poutres, planchers, dalles, dallages, fondations, éléments de façade, mobiliers urbains, etc.).

Les BAP sont particulièrement adaptés à la réalisation de structures pour lesquelles la mise en œuvre d'un béton classique est délicate, c'est-à-dire, présentant :

– des densités de ferraillage importantes ;
– des formes et des géométries complexes : voiles courbes, etc. ;
– des voiles minces et de grande hauteur : piles de ponts, etc. ;
– des voiles complexes avec de nombreuses réservations ou de grandes ouvertures ;
– des exigences architecturales et de qualité des parements particulières ;
– des accès difficiles voire impossibles pour déverser le béton dans le coffrage et pour assurer la vibration.





Photo : © Bouygues Construction

3.3.6 - Précautions pour l'emploi des BAP

La fluidité des BAP et leurs caractéristiques aux jeunes âges nécessitent le respect de quelques précautions particulières lors de leur mise en œuvre.

• Préparation et organisation spécifiques du chantier (changement des habitudes et évolution des méthodes traditionnelles de construction) : matériels – personnels – utilisation de la grue – phasage de réalisation – calages rigoureux des armatures et des réservations.

• Emploi de coffrages propres, étanches et plus résistants afin de compenser les poussées hydrostatiques sur les coffrages.

• Utilisation d'agents de démoulage de qualité afin d'éviter les phénomènes de micro-bullage.

• Cure soignée (ces bétons étant plus sensibles aux phénomènes de retrait par dessiccation).

Comme pour tous types de béton des délais de décoffrage différents peuvent générer des différences de teintes des parements.

3.3.7 - Les atouts des BAP

Les BAP présentent une avancée importante en matière de technologie de construction. Leurs propriétés spécifiques permettent d'optimiser l'organisation des chantiers et des usines, conduisant à une amélioration de la productivité et une réduction des coûts de construction.

Les BAP sont particulièrement adaptés pour la réalisation d'ouvrages en zones sensibles soumises à des exigences acoustiques (notamment en site urbain). Ils permettent d'améliorer les conditions d'environnement sur les chantiers.

Les atouts des BAP sont multiples :

– réduction des temps de bétonnage (augmentation des cadences de coulage, en particulier, grâce à la mise en œuvre possible du béton à la pompe) ;
– facilité de mise en œuvre et gain sur les postes de travail, obtenu par le pompage du béton et la suppression de la vibration ;
– amélioration de la sécurité des ouvriers, en supprimant des postes de travail à risque (en partie haute des coffrages au moment du bétonnage en particulier).
– réduction des délais de réalisation du chantier et des éléments préfabriqués en usine ;
– économie sur les coûts de la main d'œuvre nécessaire à la vibration ;
– réduction des besoins en matériel ;
– amélioration de la productivité et des cadences ;
– optimisation de la charge d'utilisation de la grue de chantier ;
– réduction des coûts d'entretien des coffrages et des moules ; ces derniers ne sont pas sollicités par les effets de la vibration.
– réduction de l'encombrement sur chantier ;
– optimisation de l'organisation des chantiers ;
– réduction des nuisances sonore pour l'environnement du chantier et sur le chantier ;
– meilleure qualité des parements ;
– la possibilité de résoudre des contraintes techniques, générées par la complexité des formes des structures, la densité du ferraillage, la réalisation des réservations complexes.

3.3.8 - Atouts des BAP pour la réalisation des parements

La fluidité et la cohésion élevée des BAP et l'absence de ségrégation garantissent la réalisation de parements de qualité, une finition soignée, une teinte homogène, l'absence de bullage et de ségrégation ainsi qu'une parfaite netteté des arêtes et des chanfreins si les modes de mise en œuvre sont adaptés.

L'absence de vibration permet d'assurer de manière naturelle l'homogénéité du BAP dans la masse et donc l'uniformité des textures et des teintes. La maîtrise des performances des BAP, la facilité et la fiabilité de leur mise en œuvre, garantissent la reproductibilité de l'aspect ainsi que la continuité et l'uniformité des parements au cours du chantier. L'offre étendue des BAP permet d'obtenir une multitude d'aspects de surfaces, de teintes et de textures.

Les BAP constituent une réponse adaptée au cahier des charges de la certification QUALIF-IB « Éléments architecturaux en béton fabriqués en usine » qui est particulièrement exigeant en matière de régularité de teinte, de texture et de durabilité. Ils sont au service de l'esthétisme. Ils offrent aux architectes de nouvelles libertés de construction et possibilités d'expression :
– formes et géométries complexes ;
– esthétisme, uniformité des parements et homogénéité des teintes.

L'optimisation des performances des BAP pour la réalisation de parements sur chantier nécessite :
– que l'ouvrage soit conçu avec une approche globale à la fois lors de la conception, et l'organisation du chantier et lors de sa réalisation ;
– que l'entrepreneur, le fournisseur de coffrage et le fournisseur de béton organisent ensemble dans un esprit de partenariat avant le démarrage du chantier les procédures et phasages du bétonnage.

Nota
La faible porosité de surface améliore la résistance aux salissures des parements.

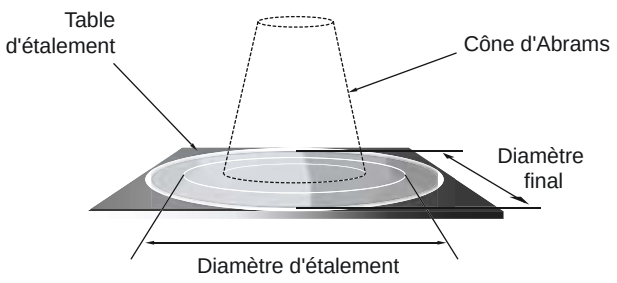


3.3.9 - Contrôle des BAP

Trois principaux essais permettent de caractériser et de contrôler la rhéologie des BAP.

Mesure d'étalement au cône d'Abrams

La fluidité des BAP peut être caractérisée par la mesure de l'étalement au cône d'Abrams (essai d'étalement ou slump flow). Des valeurs cibles de l'ordre de 600 à 750 mm correspondent à l'étalement moyen conseillé d'un BAP. La valeur cible d'étalement doit être définie en fonction des caractéristiques de la formulation et des conditions et méthodes de mise en œuvre. Cet essai caractérise la mobilité du BAP en milieu non confiné. Il permet en particulier de vérifier la fluidité du béton lors de sa réception sur chantier.



Essai au cône d'Abrams

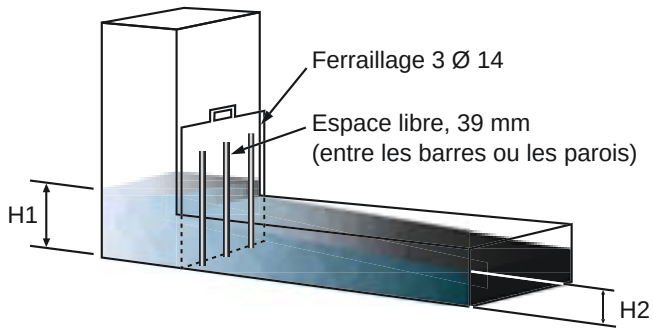




Photo : © Bouygues Construction

Essai de la boîte en L, écoulement en milieu confiné

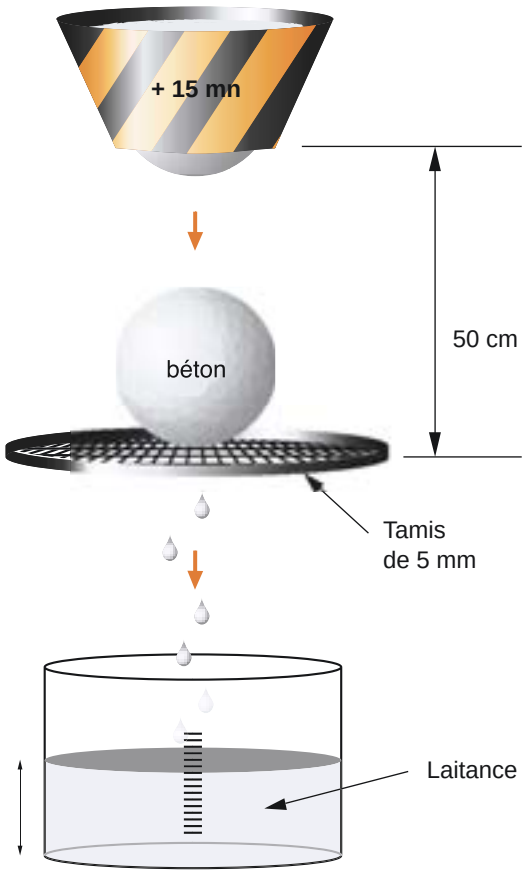
La cohésion du béton, sa mobilité en milieu confiné et son aptitude à traverser une zone fortement armée peut se mesurer avec l'essai de la boîte en forme de L. Cet essai permet de vérifier que la mise en place du béton ne sera pas contrariée par des blocages de granulats en amont des armatures. La méthode consiste à remplir de BAP la partie verticale d'une boîte, puis en levant une trappe à laisser le béton s'écouler dans la partie horizontale à travers un ferraillage (le nombre et le diamètre des armatures peuvent être adaptés pour traduire le ferraillage réellement présent dans la structure). Après écoulement du béton, on mesure la différence de hauteur dans les parties verticales (H1) et horizontale (H2). Le résultat de l'essai s'exprime par le taux de remplissage H2/H1. Une valeur de ce rapport supérieure à 0,8 traduit un bon écoulement du BAP.



Essai de boîte en L

Essai de stabilité au tamis

Cet essai permet d'étudier la résistance à la ségrégation et au ressuage du BAP, qui doit être stable sous l'effet de la gravité. Il consiste à déverser une quantité de béton (2 litres) sur un tamis (de maille 5 mm) avec une hauteur de chute de 50 cm.
Le pourcentage en poids de laitance ayant traversé le tamis par rapport au poids de l'échantillon initial exprime la stabilité du béton. Ce rapport doit être compris entre 10 % et 20 %.



Essai au tamis

3.3.10 - Documents de référence

• ***Bétons autoplaçants*** – recommandations provisoires AFGC, juillet 2000.
Ces recommandations d'emploi des BAP, mis au point par un groupe d'expert de l'Association Française de génie civil, couvrent les aspects suivants : définition, formulation, caractérisation du béton frais, qualification de la formule, fabrication du béton autoplaçant, critères de réception sur chantier, mise en œuvre, propriété du béton durci. Elles constituent un état de l'art global de la connaissance sur les BAP.



• ***Bétons autoplaçants*** – *monographie d'ouvrages,* Cimbéton 52.

• ***Recommandations de mise en œuvre des BAP et des BAN*** – FFB.

• ***Guide européen sur les BAP.***
Ce guide a été réalisé par les fédérations européennes de la filière béton : BIBM[1], ERMCO[2], EFNARC[3] et EFCA[4]. Il comporte des recommandations pour l'utilisation des BAP tant sur chantier que pour les produits préfabriqués. Le guide traite des constituants, des principes de formulation, des contrôles adaptés à la rhéologie des BAP, de leur mise en place ainsi que leurs propriétés (notamment la durabilité, le fluage et le retrait). Il propose également des seuils permettant de classer les BAP selon leurs caractéristiques rhéologiques.

1. Bureau International du Béton manufacturé.
2. Association européenne du Béton Prêt à l'Emploi.
3. Fédération européenne des associations pour les systèmes de construction en béton.
4. Fédération européenne des associations des adjuvants pour béton.



3.3.11 - Le projet national BAP

Les travaux du Projet National « Bétons Autoplaçants » (BAP), géré par l'IREX ont porté sur la caractérisation des BAP à l'état frais lors de leur mise en œuvre et à l'état durci.

Les résultats obtenus par des essais en laboratoire et des expérimentations en vraie grandeur ont confirmé que les BAP se distinguent des bétons traditionnels principalement par leurs propriétés à l'état frais. Ils sont comparables à l'état durci aux bétons ordinaires vibrés de même résistance mécanique. Ils ont permis :
– de valider les tests et essais pertinents de caractérisation des propriétés des BAP à l'état frais (représentativité des essais, reproductibilité, répétabilité) et d'analyser la « sensibilité » des formulations ;
– de définir les recommandations pratiques de fabrication, de mise en œuvre et d'emploi des BAP ;
– d'identifier l'incidence des propriétés des BAP sur les dimensionnements des ouvrages et sur les évolutions des méthodes de construction afin de valoriser les progrès technologiques et architecturaux offerts par ces nouveaux bétons ;
– de mesurer la contribution des BAP à l'amélioration des conditions de travail et à la protection de l'environnement ;
– de faire évoluer les réglementations.

Le PN BAP qui regroupait tous les partenaires de l'acte de construire (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises, préfabricants, laboratoires, fournisseurs de matériaux, organismes de contrôle), a conduit à des avancées significatives en particulier sur les plans technologiques et réglementaires, des règles de l'art et de connaissance du matériau dans son environnement de chantier.

Le PN BAP a mis au point une classification des propriétés des BAP à l'état frais prenant en compte en particulier le type d'application (verticale ou horizontale), l'épaisseur de la paroi ou de la dalle et le temps nécessaire pour la mise en place du BAP (intervalle d'écoulement), en fonction de la géométrie de l'ouvrage, de la répartition des armatures et du procédé de bétonnage utilisé.

3.3.12 - Conclusions

Les BAP affirment leurs performances au fil des réalisations sur chantiers et en usines de préfabrication, ils s'imposent progressivement et remplaceront dans les prochaines années pour un grand nombre d'applications les bétons mis en œuvre par vibration.

Les BAP sont la réponse à l'évolution :
- des exigences techniques et esthétiques des maîtres d'ouvrage, des maîtres d'œuvre et des architectes ;
- des contraintes économiques des entreprises (amélioration de la productivité des chantiers et en usines) ;
- de l'amélioration des conditions de travail et de sécurité sur les chantiers et dans les usines.

Ces nouveaux bétons sont générateurs d'économies globales sur les chantiers.

La banalisation de l'utilisation des BAP, et leur développement dans les prochaines années, suppose une parfaite synergie entre tous les acteurs de la construction et nécessite une adaptation et une évolution des techniques de production du béton et de mise en œuvre, une préparation en amont des chantiers pour adapter son organisation et les techniques de construction (cadences, matériels, coffrages, etc.) et une conception globale tirant le meilleur profit de l'adéquation entre le béton et



l'ouvrage à chaque étape du chantier. Le BAP doit être spécifié au niveau de l'appel d'offres et intégré dans les choix structuraux dès la conception du projet jusqu'à sa réalisation afin d'optimiser le coût global de l'ouvrage.

Les BAP présentent un grand intérêt pour la réalisation des produits préfabriqués en béton. Ils sont de plus en plus utilisés en usine pour réaliser de nombreux produits. Les compositions sont optimisées en fonction des applications visées, des contraintes techniques et économiques. Ces nouveaux matériaux sont appréhendés dans le cadre d'une démarche globale prenant en compte les gains potentiels sur l'ensemble du cycle de vie des produits préfabriqués : matières premières utilisées, énergie consommée au cours du process de fabrication, réduction des nuisances, diminution de la pénibilité des tâches, durabilité, esthétique, utilisation dans l'ouvrage et réutilisation en fin du cycle de vie…

3.4 Les bétons fibrés

3.4.1 - Généralités

Un béton fibré est un béton dans lequel sont incorporées des fibres. À la différence des armatures traditionnelles, les fibres sont réparties dans la masse du béton, elles permettent de constituer un matériau qui présente un comportement plus homogène.
Les fibres, selon leur nature ont un comportement contrainte-déformation très différent. Elles peuvent, sous certaines conditions et pour certaines applications ou procédés, remplacer les armatures traditionnelles passives. Les bétons fibrés font l'objet de méthodes spécifiques de dimensionnement pour des applications structurelles (dalles, dallages industriels, voussoirs, pieux, etc.). Des méthodes d'optimisation de leur formulation ont été spécialement développées.

Les fibres présentent des caractéristiques, tant géométriques que mécaniques, différentes selon leur nature. Chacune a une influence particulière sur les lois de comportement mécanique du béton, ce qui se traduit par des applications adaptées et spécifiques.



Exemples de fibres métalliques.

3.4.2 - Les différents types de fibres

On distingue trois grandes familles de fibres.

- Les fibres métalliques :
 – acier ;
 – inox ;
 – fonte (amorphe).

- Les fibres organiques :
 – polypropylène ;
 – polyamide ;
 – acrylique.
 – mélange polypropylène/polyéthylène ;
 – kevlar ;
 – aramide ;
 – carbone.

- Les fibres minérales :
 – verre ;
 – wollastonite ;
 – basalte ;
 – mica.

Chaque fibre présente des caractéristiques et des propriétés qui lui sont propres : dimensions (diamètre, longueur, etc.), formes (lisses, crantées, ondulées, biondulées, à crochet, munies de cônes aux extrémités, etc.), résistances mécaniques (résistance à la traction). Les dosages courants en fibres sont de l'ordre de 0,5 à 2 % en volume soit de 5 à 150 kg par m^3 de béton.

3.4.3 - Les caractéristiques et les propriétés des fibres

Chaque famille de fibres présente des caractéristiques et des propriétés spécifiques.

Caractéristiques et propriétés spécifiques de chaque famille de fibres					
	Masse volumique (en g/cm³)	***Diamètre moyen (en µm)***	***Résistance à la traction (en N/mm²)***	***Module d'élasticité (en GPa)***	***Allongement à la rupture (en %)***
Fibres métalliques	7,85	50 - 1 000	1 000 - 2 500	150 - 200	3 - 4
Fibres de verre	2,6	9 - 15	2 000 - 3 000	80	2 - 3,5
Fibres polypropylène	0,9	> 4	500 - 750	5 - 10	10 - 20

Longueur des fibres : 5 à 60 mm
Coefficient de dilatation : 1 à 90 µm/m °C

Pour faciliter leur utilisation, les fibres doivent :
– être faciles à incorporer dans le béton et ne pas perturber le malaxage (leur dispersion dans le béton doit être rapide) ;
– se répartir de manière homogène lors du malaxage au sein du béton (pas d'agglomération de fibres) et lors du bétonnage.

> ***Nota***
> *L'influence des fibres sur la maniabilité du béton dépend de leur dimension et de leur dosage.*

Pour améliorer les performances mécaniques des bétons (ductilité, résistance en flexion, résistance aux chocs, etc.), elles doivent :
– être déformables sans être fragiles ;
– être relativement longues et fines et présenter une grande surface spécifique ;
– offrir une bonne capacité de déformation ;
– posséder un module d'élasticité plus élevé que celui de la matrice cimentaire ;
– présenter une bonne adhérence avec la pâte de ciment.

> ***Nota***
> *La structure du béton fibré et ses caractéristiques mécaniques* in situ *dépendent aussi de sa mise en œuvre (effets liés à l'écoulement ; orientation préférentielle des fibres parallèlement au sens de l'écoulement du béton et à la géométrie de la structure). Il est donc nécessaire pour la mise au point de la formulation, de connaître la technique de mise en œuvre.*

3.4.4 - Le rôle des fibres

Les fibres ont généralement pour rôle de renforcer ou remplacer l'action des armatures traditionnelles en s'opposant à la propagation des microfissures.

Elles peuvent également dans certaines applications remplacer les armatures passives.

Selon les fibres utilisées (forme et nature) et les ouvrages auxquels elles sont incorporées, ce rôle se traduit par des améliorations relatives à :
– la cohésion du béton frais ;
– la déformabilité avant rupture ;
– la résistance à la traction par flexion ;
– la ductilité et la résistance post fissuration ;
– la résistance aux chocs ;
– la résistance à la fatigue ;
– la résistance à l'usure ;
– la résistance mécanique du béton aux jeunes âges ;
– la réduction des conséquences du retrait par effet de couture des microfissures ;
– la tenue au feu ;
– la résistance à l'abrasion.

3.4.5 - Les atouts des fibres

Grâce à leurs propriétés mécaniques, les fibres, permettent de mieux mobiliser la résistance intrinsèque du béton, de réaliser des pièces minces de grandes dimensions et d'offrir au concepteur une plus grande liberté architecturale. Elles confèrent aux bétons de nombreux atouts :
– la maîtrise de la fissuration ;
– une facilité et rapidité de mise en œuvre ;
– un renforcement multidirectionnel et homogène ;
– un remplacement partiel ou total des armatures passives.

> ***Nota***
> *Certaines fibres confèrent au béton un comportement ductile.*

L'incorporation de fibres dans le béton doit faire l'objet d'une étude de formulation et d'une vérification de la compatibilité avec les autres constituants. Les bétons fibrés nécessitent souvent un dosage en superplastifiant plus élevé pour maintenir l'ouvrabilité du béton. Des essais peuvent être nécessaires pour déterminer, la nature, la taille et le dosage des fibres en fonction des caractéristiques et des performances requises.

3.4.6 - Les domaines d'application des bétons fibrés

Les bétons fibrés peuvent être utilisés pour une grande variété d'applications en bâtiment et en génie civil :
– béton coulé en place (dalles, planchers, fondations, voiles, pieux, etc.) ;
– béton préfabriqué (poutres, voussoirs, tuyaux d'assainissement, etc.) ;
– béton projeté (voie mouillée/voie sèche, construction et réparation de tunnels, confortement de parois, etc.) ;
– mortiers (prêts à l'emploi) de réparation et de scellement.
Le choix du type de fibres est fonction du domaine d'application et des performances souhaitées

3.4.7 - Les fibres polypropylène

Ces fibres obtenues par extrusion du polypropylène, se présentent en faisceaux ou sous forme de filament individuel. Lorsqu'elles sont utilisées sous forme de faisceaux, elles se séparent lors du malaxage. Elles se répartissent de façon multidirectionnelle dans le béton.

Les fibres polypropylène permettent en particulier de mieux contrôler le retrait plastique du béton frais mais n'améliorent pas son comportement post-fissuration (contrairement aux fibres métalliques).



Elles améliorent la maniabilité et la cohésion du béton (en particulier dans le cas de béton projeté). Elles sont particulièrement souples et insensibles chimiquement mais peu résistantes au feu (température de fusion comprise entre 140 à 170 °C).

La fabrication du béton avec des fibres de polypropylène ne soulève pas de difficulté particulière. La répartition des fibres est facile et ne nécessite pas de précautions spécifiques lors du malaxage. L'optimisation de l'adjuvantation permet de réaliser des bétons dont l'ouvrabilité est conservée. Le grand avantage des bétons de fibres de polypropylène est leur bonne résistance à la fissuration due au « premier retrait », ainsi que leur résistance aux chocs.

De ces propriétés découlent les applications privilégiées des bétons de fibres de polypropylène :
– dallages et aménagements urbains ;
– produits préfabriqués (parements) ;
– mortiers projetés ;
– enduits ;
– sculptures.
Les propriétés des fibres polypropylène sont intéressantes pour les pièces à démoulage immédiat (meilleur comportement du béton frais) et les

éléments préfabriqués (meilleure résistance mécanique au jeune âge). Elles améliorent l'aspect et la précision des angles, des tranches ou des arêtes des pièces moulées. Elles permettent de réaliser des parements esthétiques, avec des motifs très précis, et sont utilisées aussi pour la formulation des bétons projetés ou des mortiers de réparation.

Atouts des fibres polypropylène pour la tenue au feu des bétons

Le béton est un matériau poreux qui renferme de l'eau dont une partie correspond à de l'eau excédentaire nécessaire à l'ouvrabilité à l'état frais. En cas d'élévation importante de la température, l'eau, restée prisonnière, se transforme en vapeur. Dans le cas des bétons particulièrement compacts, l'élévation de la température est susceptible de créer des contraintes internes pouvant entraîner un écaillage du béton en surface.

L'incorporation dans le béton de fibres polypropylène (1 à 3 kg/m^3) permet d'améliorer la tenue au feu des bétons dont la compacité est particulièrement élevée. Les observations montrent que les fibres fondent lorsque les températures atteignent 140 à 170 °C. Elles créent ainsi en fondant un réseau tridimensionnel constitué d'une multitude de petits capillaires connectés (réseaux de drains) susceptibles de permettre à la vapeur d'eau de s'échapper évitant ainsi les surpressions. Ce phénomène constitue un moyen efficace pour limiter l'écaillage de surface d'un béton soumis à une élévation de température excessive.

3.4.8 - Les fibres métalliques

Les fibres métalliques, notamment d'acier, ont fait l'objet de nombreuses recherches pour développer leurs emplois dans le béton. Elles présentent une très bonne compatibilité avec le béton.

Les recherches visant à améliorer l'adhérence au béton ont permis de développer une grande variété de fibres capables, par leur forme ou leur état de surface, de mieux s'ancrer dans le béton :
– fibres ondulées - crantées - torsadées-droites ;
– fils, rubans ;
– fibres à extrémités aplaties, à crochets, à têtes coniques, etc.

Les bétons de fibres métalliques ont une bonne résistance à la traction et à la flexion. Ils sont utilisés dans les dallages et les sols industriels (sur sol ou sur pieux), pour la fabrication de voussoirs de tunnels, de coques ou la confection de pieux ou pour réaliser des bétons projetés (pour la construction ou la réparation de revêtements de tunnels et de galeries et le confortement de parois de soutènement en béton), pour la réalisation de nombreux produits préfabriqués ainsi que pour la confection de mortier de réparation ou de scellement.

Atouts des fibres métalliques dans les bétons structurels

Les fibres métalliques sont utilisées pour améliorer le comportement mécanique d'un béton de structure. En effet, elles contribuent à la réduction de la largeur des fissures dans la matrice béton (limitation de l'ouverture des fissures et répartition de la microfissuration).

Elles se substituent partiellement aux armatures traditionnelles. Dans certains cas, pour des bétons subissant de faibles sollicitations, elles peuvent même remplacer complètement les armatures. Elles sont, en particulier, utilisées pour réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, améliorer la résistance en traction et au choc. Elles confèrent au béton une certaine ductilité et une plus grande résistance à la rupture.

Spécificité du comportement des bétons fibrés avec des fibres métalliques

Si l'on applique un effet de traction au béton fibré, il se comporte avant rupture selon trois phases :
– les fibres et le béton agissent ensemble dans une phase élastique ;
– des microfissures se produisent, l'effort de traction est repris par les fibres qui limitent la propagation de la fissuration ;
– les fissures se développent, les fibres perdent leur adhérence avec la matrice.

Toute fibre d'acier qui traverse une fissure crée en quelque sorte un « pont » entre les deux bords de la fissure. Ce pont va permettre le transfert d'une partie de la contrainte ayant entraîné l'ouverture de la fissure. C'est ainsi qu'une fibre s'oppose à l'élargissement de la fissure, jouant véritablement le rôle d'une couture et augmente la résistance du béton après fissuration.

Les fibres métalliques permettent donc de "coudre" les microfissures et évitent leur propagation, ce qui empêche ou retarde l'apparition de macrofissures. Elles apportent des caractéristiques mécaniques post-fissuration au béton.

Du fait de leurs propriétés, les fibres métalliques trouvent un vaste domaine d'applications, si l'on veut réduire les risques de fissuration, espacer les joints de retrait, augmenter la résistance aux chocs et tirer parti de l'amélioration de la résistance en traction pour optimiser le dimensionnement des pièces.

3.4.9 - Les fibres de verre

Les fibres de verre sont, grâce à leurs qualités mécaniques et leur rigidité, des renforts très efficaces, mais elles sont sensibles aux alcalis libérés par l'hydratation du ciment (protection ou imprégnation nécessaire).

> ***Nota***
> *Certaines fibres de verre présentent des propriétés « alcali-résistantes ».*

Atouts des fibres de verre comme armatures de parois minces

En préfabrication, les domaines d'application sont très vastes. Les fibres de verre permettent la réalisation d'éléments de faible épaisseur (éléments architectoniques, éléments de bardage, panneaux de façade, etc.), de mobilier urbain et de produits d'assainissement.

- Panneaux de façade minces de 10 à 15 mm d'épaisseur ou panneaux sandwich à isolant incorporé.
- Éléments de bardage et éléments décoratifs.
- Éléments divers : coffret, coffrages, habillages.
- Produits d'assainissements : tuyaux, caniveaux.

Elles présentent une excellente résistance au feu (jusqu'à 800 °C). Cette caractéristique et son coefficient de dilatation du même ordre que celui de la pâte de ciment confèrent aux bétons de fibres de verre une bonne résistance à des températures élevées.

Sur chantier, les mortiers de fibres de verre s'utilisent pour les enduits extérieurs monocouches, ainsi que pour certains procédés d'isolation thermique.

> ***Nota***
> *Les bétons de fibres de verre sont couramment dénommés CCV (Composite Ciment Verre) ou, en anglais, GRC (Glass Reinforced Cement).*

3.4.10 - Les techniques de mise en œuvre

Les bétons fibrés peuvent être mis en œuvre sous différentes formes.

- Béton coulé en place :
 – à la pompe ;
 – à l'aide d'une benne munie d'un manchon.
- Béton préfabriqué.
- Béton projeté.

> ***Nota***
> *L'incorporation des fibres dans le béton doit être particulièrement soignée, elle peut se faire :*
> *– au malaxage (en centrale à béton) ;*
> *– au moment du coulage (dans la toupie sur le chantier) ;*
> *– lors de la projection (béton projeté).*

L'emploi de superplastifiant est recommandé pour compenser la diminution d'ouvrabilité provoquée par l'incorporation de fibres.

Domaines d'application privilégiés par type de fibres			
Type de fibres	***Dosage courant***	***Domaine d'application privilégié***	***Exemples d'application***
Fibres métalliques	0,5 à 2 % en volume 40 à 160 kg/m³	Renfort pour bétons structurels et armature structurelle	– Dallages, sols industriels, planchers, dalles de compression – Éléments préfabriqués – voussoirs de tunnels, poutres, conteneurs, tuyaux – Bétons projetés en travaux souterrains, stabilisation de pente et ouvrages d'assainissement – Pieux de fondation, semelles filantes
Fibres polypropylène	0,5 à 2 % en volume 0,5 à 2 kg/m³	Limitation de la fissuration liée au retrait Amélioration de la tenue au feu des bétons	– Dallage – Voussoirs de tunnels – Revêtement d'ouvrages souterrains – Mortiers projetés – Parements esthétiques
Fibres de verre	1 à 2 %	Réalisation d'éléments préfabriqués très minces	– Parements architectoniques – Panneaux de façade – Éléments décoratifs

3.5 Les Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances – BFUP

Les progrès dans le domaine des adjuvants, des méthodes de formulation et de l'utilisation des ultrafines ont conduit à une évolution spectaculaire des bétons. La gamme s'est élargie : des bétons courants, de résistance en compression de 30 MPa, aux Bétons à Hautes Performances (BHP : plus de 50 MPa) et à Très Hautes Performances (BTHP : plus de 80 MPa). Une rupture technologique est intervenue au début des années 90 avec la mise au point de bétons dont la résistance dépasse les 150 MPa. Les **Bétons Fibrés à Ultra hautes Performances** (BFUP), derniers nés de cette génération de bétons, sont des matériaux à matrice cimentaire, renforcés par des fibres et offrant des résistances en compression comprises entre 150 et 250 MPa.

Leur formulation fait appel à des adjuvants superplastifiants et des compositions granulaires spécifiques ainsi qu'à des fibres (fibres métalliques ou organiques). Pour les BFUP structuraux la présence de fibres et les performances en traction conduisent à un comportement pseudo-ductile permettant de s'affranchir de tout ou partie des armatures passives. Ces bétons révolutionnent les techniques et méthodes de construction et permettent la conception de nouvelles structures.

Ces bétons offrent des performances exceptionnelles :
– une très grande ouvrabilité ;
– une compacité très importante ;
– une faible perméabilité ;
– des résistances caractéristiques à la compression à 28 jours très élevées comprises (pour les BFUP structuraux) entre 150 et 250 MPa ;
– des résistances mécaniques, au jeune âge, très élevées ;
– une durabilité exceptionnelle (ce qui permet de les utiliser dans des environnements très agressifs) ;
– une ductilité (déformabilité sous charge sans rupture fragile) importante ;
– une ténacité (résistance à la micro-fissuration) élevée ;
– un retrait de dessication et un fluage très faibles ;
– une dureté de surface très importante ;
– une grande résistance à l'abrasion et aux chocs ;
– des aspects de parements particulièrement esthétiques et une texture de parement très fine.

Ils permettent une optimisation des frais de maintenance et d'entretien des ouvrages, et de nouvelles perspectives constructives.

L'évolution des BFUP par rapport aux Bétons à Hautes Performances (BHP) se caractérise par :

– leurs très grandes résistances en compression mais aussi en traction ;
– leur composition spécifique et leur fort dosage en ciment (700 à 1 000 kg/m^3) et en adjuvants ;
– leur squelette granulaire spécifique (4 à 5 échelles de grains) et l'optimisation de leur empilement granulaire ;
– l'utilisation de granulats de faibles dimensions et faisant l'objet d'une sélection particulière ;
– une teneur en eau beaucoup plus faible ;
– la présence de fibres (à un taux élevé de l'ordre de 2 à 3 % en volume).

Les BFUP peuvent notamment, être associés à de la précontrainte par pré-tension ou par post tension, plus rarement à des armatures passives.

Les diverses formulations des BFUP permettent de leur conférer des propriétés complémentaires adaptées aux exigences spécifiques des projets.

3.5.1 - Historique des BFUP et produits disponibles sur le marché français

À partir des années 1990, une véritable rupture s'est produite dans le développement des connaissances sur le béton avec la mise au point de nou-



veaux concepts sur la formulation des matrices cimentaires, l'utilisation de fibres et l'optimisation des empilements granulaires.

Bouygues a été, en 1992-1995, à l'initiative du développement du BPR (Béton de Poudres Réactives) aux performances mécaniques et à la durabilité exceptionnelles laissant entrevoir de nouvelles voies pour la conception des structures.

En 1996-1999, EDF a utilisé des BFUP pour la rénovation de poutres en béton dans des aéroréfrigérants de centrales nucléaires (milieu particulièrement agressif). Les contrôles réalisés ces dernières années confirment la durabilité de la solution retenue.

En France plusieurs BFUP sont proposés à l'échelle industrielle depuis le début des années 2000 :
– le DUCTAL qui est le fruit d'un programme de recherche visant à optimiser le BPR dans le cadre d'un partenariat entre Bouygues, Lafarge et Rhodia. La gamme DUCTAL est commercialisée par Lafarge (DUCTAL FO à base de fibres organiques pour les applications architectoniques, DUCTAL FM à base de fibres métalliques pour les applications structurelles et DUCTAL FM résistant au feu).
– les entreprises Eiffage et Sika ont développé le BSI Ceracem (BSI structurel et BSI architectonique) ;
– Le cimentier Vicat associé au groupe Vinci a mis au point le BCV (Béton Composite Vicat).

Le Cemtec, BFUP développé au LCPC (actuel IFSTTAR) à base d'une association de fibres métalliques courtes et longues a notamment été optimisé et appliqué dans le cadre de projets européens en partenariat avec l'EPFL.

3.5.2 - Principes de formulation des BFUP

L'obtention de résistances élevées et de faibles perméabilités aux agents agressifs passe par une réduction très importante de la porosité et plus précisément du réseau des pores connectés, en jouant sur deux paramètres :
– une teneur en eau extrêmement faible, grâce à l'utilisation optimisée de superplastifiants qui défloculent les grains de ciment (rapport E/C de 0.15 à 0.25) ;
– une compacité maximale, obtenue en utilisant des composants correspondant à plusieurs classes granulaires (classiquement quatre à cinq qui incluent ciment, ultrafines, fillers et sable). La taille et la quantité des plus gros grains sont considérablement réduites (diamètre maximal variant de 1 à 7 mm, les granulats faisant l'objet d'une sélection particulière). L'optimisation de l'empilement granulaire permet de diminuer le volume des vides.

Les BFUP présentent ainsi une très faible porosité capillaire.

Les ultrafines utilisées dans les BFUP sont en général des fumées de silice qui remplissent les espaces intergranulaires, optimisant la compacité du matériau, et qui réagissent grâce à leur pouvoir pouzzolanique avec la chaux issue de l'hydratation du ciment. Elles améliorent la rhéologie du béton frais, participent activement à la résistance de l'ensemble et ferment le réseau des pores à la diffusion des ions et des gaz. D'autres ultrafines peuvent être également utilisées telles que les microfillers calcaires ou

Exemples de formulations de BFUP (pour 1 m³)						
Ciment	***Sable fin***	***Quartz broyé***	***Fumée de silice***	***Fibres métalliques***	***Adjuvant (extrait sec)***	***Eau totale***
710 kg	1 020 kg	200 kg	230 kg	160 kg	10 kg	140 l
1 075 kg	1 050 kg	—	160 kg	220 kg	35 kg	200 l

siliceux et les pouzzolanes naturelles ou artificielles (métakaolins).

L'emploi d'adjuvants, tels que les plastifiants réducteurs d'eau et les superplastifiants fluidifiants, permet de formuler les BFUP avec un très faible rapport Eeff/Liant équivalent.

Les fibres, composant clé des BFUP confèrent au matériau sa ductilité. Ces fibres ont une longueur adaptée à la taille du plus gros grain et une section assez faible. Elles ont en général un diamètre de 0,1 à 0,3 mm et une longueur de 10 à 20 mm.

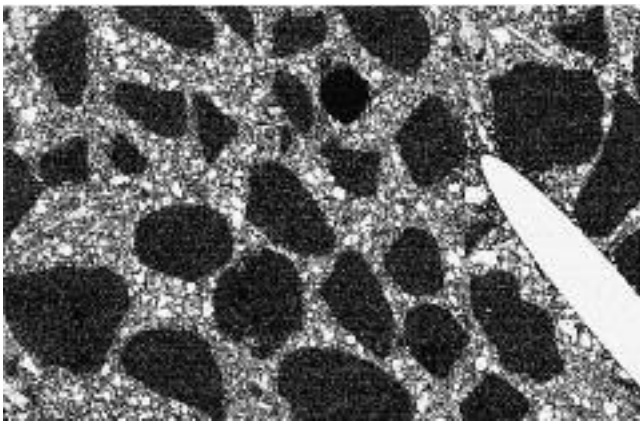
Les fibres métalliques sont utilisées pour des applications structurelles nécessitant des résistances mécaniques importantes, les fibres polymères et organiques plutôt pour des applications esthétiques et des éléments non structurels. Les fibres polypropylène sont ajoutées pour éviter l'écaillage du béton en cas d'exposition au feu.

3.5.3 - Microstructure des BFUP et potentiel de cicatrisation

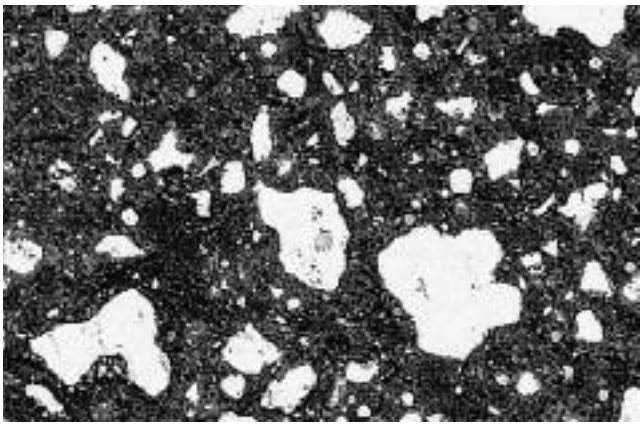
Les BFUP sont des matériaux à structure micrométrique (les composants des BFUP varient du millimètre au nanomètre).

Ils présentent, du fait de leur granulométrie très fine et optimisée, une porosité très faible non connectée à l'échelle du nanomètre ainsi qu'une absence de porosité capillaire. Cette propriété garantit une très faible perméabilité aux agents agressifs.

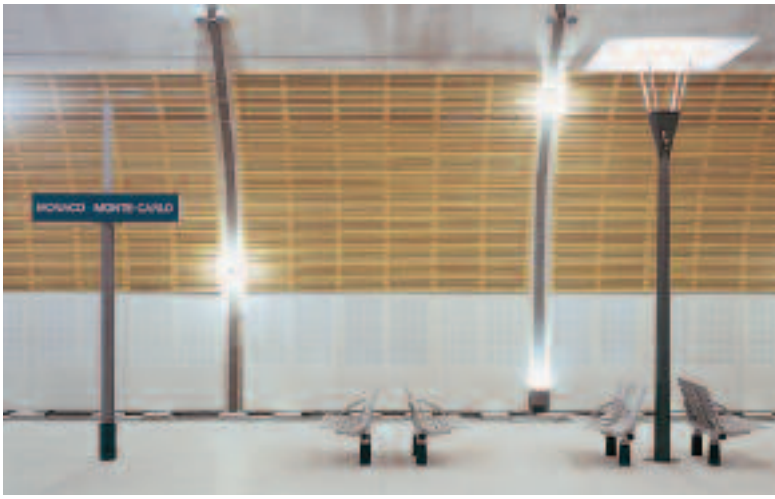
À grossissement relativement faible (x 200), la pâte d'un BFUP laisse apparaître en clair des particules de clinker non hydraté qui jouent le rôle de micro-granulats à surface très active et de haut module d'élasticité (120 000 MPa).



Micrographie au microscope électronique à balayage d'un BFUP200 (grossissement 50) : la phase grise interstitielle représente le mélange des silicates de calcium hydratés et de fumée de silice. En foncé les grains de sable ; les grains blancs sont du clinker anhydre. Les ellipses blanches sont des sections de fibres métalliques. Pour observer la microstructure de la phase interstitielle (« pâte de BFUP »), une micrographie par microscopie électronique à balayage a été réalisée en mode électrons rétrodiffusés sur section polie (grossissement 200).



Le dosage en eau est inférieur à celui nécessaire pour l'hydratation complète du ciment. Les BFUP possèdent ainsi une réserve de ciment anhydre qui leur procure un potentiel d'auto-cicatrisation en cas de fissuration. L'eau pénétrant éventuellement par les fissures va permettre la formation d'hydrates au sein des microfissures en réagissant avec les grains de clinker résiduel. Ce phénomène constitue un atout particulièrement intéressant en termes de durabilité et de protection des fibres, des câbles ou des armatures le cas échéant.



3.5.4 - Performances mécaniques

Les BFUP présentent des performances exceptionnelles aussi bien en compression qu'en traction et flexion.

Comportement en compression

Les BFUP ont un comportement quasi linéaire jusqu'à une résistance à la compression à 28 jours comprise entre 150 et 250 MPa. Le module d'élasticité varie selon les formulations entre 40 et 70 GPa.

Comportement en traction

Le comportement en traction est caractérisé par :
– un domaine de déformation élastique limité par la résistance en traction de la matrice cimentaire ; cette résistance est supérieure à 7 MPa en traction directe ;
– un domaine post-fissuration caractérisé par la résistance en traction du matériau fibré obtenue après fissuration de la matrice. Ce domaine qui permet une non-fragilité des éléments fléchis est une caractéristique indispensable à la sécurité des applications et nécessite le contrôle approprié de cette contribution mécanique du renfort fibré.

Résistance en flexion

Selon le type de formule, la géométrie du corps d'épreuve, le type de fibres et les modalités de bétonnage, les BFUP ont une résistance en flexion de l'ordre de 30 à 50 MPa.

Ductilité

La ductilité (capacité du matériau à se déformer sous charge sans rupture fragile), la résistance en traction et la ténacité (résistance à la micro-fissuration) des BFUP sont dues à la présence des fibres (pourcentage variant généralement entre 2 et 3 % en volume) et à l'interaction fibre-matrice.

Ces propriétés permettent au matériau de se déformer et de supporter des charges importantes même après apparition des premières micro-fissures.

3.5.5 - Traitement thermique

Les BFUP peuvent faire l'objet de traitements thermiques juste après la fin de leur prise, ce qui permet :
– d'obtenir des résistances mécaniques élevées très rapidement ;
– d'accélérer la maturation du matériau et de lui conférer rapidement une stabilité dimensionnelle ;
– d'obtenir des performances en traction et en compression plus élevées ;
– d'améliorer la microstructure et donc d'améliorer la durabilité grâce à une réduction de la porosité ;
– de diminuer les effets différés du retrait et du fluage ;
– de conférer une grande stabilité dimensionnelle.

Après un tel traitement thermique (qui fait notamment partie du processus de production de certains segments de la gamme DUCTAL), le retrait est quasi inexistant et le fluage très fortement réduit.

Ce traitement thermique, distinct de l'étuvage destiné à accélérer la prise, consiste en effet à soumettre la pièce à une température de l'ordre de 90 °C et une humidité proche de la saturation pendant 48 heures.

3.5.6 - Propriétés des BFUP

Les BFUP offrent de multiples propriétés adaptables aux exigences spécifiques de chaque application.

Ouvrabilité

Les formules types de BFUP conduisent, le plus souvent, à des bétons, de consistance fluide, ils sont en général autoplaçants et pompables ce qui permet un remplissage aisé des coffrages et des moules. La plage d'ouvrabilité est cependant très large. Il est possible aussi à l'inverse de réaliser des BFUP par extrusion.

Retrait – Fluage

Le retrait endogène de la matrice cimentaire est de l'ordre de 300 à 500 m/m. Ce retrait n'est pas gêné par le squelette granulaire, et la formation de microfissures est extrêmement faible lorsque le retrait est libre.

> ***Nota***
> *– Retrait endogène : 300 à 500 µm/m*
> *– Retrait de dessiccation : 50 à 100 µm/m*
> *– Retrait total : 500 à 1 000 µm/m*

Les BFUP ont un retrait d'autodéssication important, ce qui impose de prendre des précautions spécifiques pour ne pas gêner les déformations dans les coffrages (utilisation de moules souples) et d'en tenir compte dès les phases de jeune âge.

Grâce à la faible teneur en eau et la compacité du matériau et à l'utilisation de fumées de silice, la déformation sous charges permanentes (fluage) est très fortement réduite. Les valeurs de coefficient de fluage à long terme égaux à 0, 8 pour les matériaux sans traitement thermique et 0, 2 dans le cas d'un traitement thermique peuvent être pris en compte pour le dimensionnement des ouvrages en BFUP.

Le très faible fluage et le retrait de dessiccation quasiment nul des BFUP, les rendent particulièrement intéressants pour la réalisation d'ouvrages précontraints car les pertes de précontrainte sont ainsi fortement réduites.

Cinétique de durcissement

La cinétique de durcissement des BFUP est adaptable en fonction du type de chantier et d'application, des conditions du chantier ou du procédé de fabrication. Une résistance à la compression de 50 MPa peut être atteinte à 16 heures ce qui permet la mise en tension précoce de câbles de précontrainte par post-tension.

Résistance au Feu

Les BFUP n'ont aucune contribution au développement d'un feu. Ils sont bien sûr incombustibles comme tous les bétons.

Le calcul au feu des ouvrages en BFUP peut s'appuyer sur les principes de la norme Eurocode (NF EN 1992-1-2) moyennant une calibration appropriée des paramètres, l'évolution de la résistance relative du matériau étant assez proche de celle des BHP.

Lors d'une élévation importante de la température, l'eau présente dans le béton ne peut s'échapper, compte tenu de la perméabilité très faible des BFUP. La vapeur d'eau génère donc des surpressions internes susceptibles de provoquer l'écaillage du béton. L'utilisation de fibres de polypropylène (quelques kg par m^3 de béton) permet de créer lors de la fonte des fibres (à une température de l'ordre de 160 °C) un réseau poreux connecté qui permet à la vapeur d'eau de s'évacuer et donc d'éviter l'écaillage.

Dilatation Thermique

Le coefficient de dilatation thermique des BFUP est fonction du type de formulation. Généralement une valeur de 1, 1 x 10-5 m/°C peut être prise en compte.

Résistance au choc

Les BFUP présentent compte tenu de la présence de fibres une grande capacité de dissipation d'énergie, ce qui leur permet d'offrir une résistance au choc importante.

Conductivité thermique

Les BFUP ont une faible conductivité thermique (1, 6 W/m/K).

Masse volumique

La masse volumique des BFUP est de l'ordre de 2 400 à 2 800 kg/m^3.

3.5.7 - Fabrication, transport et mise en œuvre des BFUP

Les BFUP sont en général commercialisés sous forme de prémix manufacturés en sacs ou en Big Bag (de 500 kg ou 1 tonne) sous forme de prémélange à sec de poudres et de fibres (les fibres et les divers adjuvants peuvent être conditionnés séparément et incorporés en cours de malaxage). Le processus industriel de conditionnement bénéficie de procédures qualité garantissant la régularité et l'homogénéité des formulations et des performances.

La fabrication des BFUP nécessite une grande précision du dosage, une régularité des constituants et des contrôles rigoureux.

Une maîtrise parfaite de la quantité d'eau et du rapport eau/ciment est indispensable.

La fabrication nécessite en général des malaxeurs à fort gradient de cisaillement et possédant un grand pouvoir dispersant, une procédure de malaxage spécifique (ordre d'introduction respective des divers constituants) et des temps de malaxage importants. Aucun ajout d'adjuvant ou d'eau n'est autorisé après la fabrication du béton.

La durée entre la fabrication du BFUP et sa mise en place doit rester compatible avec les moyens de production à la centrale et de mise en œuvre sur le chantier.

Les formulations des BFUP peuvent être adaptées à toutes les techniques de mise en œuvre. Ils sont en général autoplaçants, leur mise en place dans les coffrages à la benne avec une manchette ou par pompage ne fait donc pas appel à la vibration. Ce caractère autoplaçant des BFUP facilite le remplissage des coffrages ou des moules et permet le coulage des pièces à géométrie complexe ou de parois de faible épaisseur.



La fluidité du matériau et sa faible granulométrie imposent une étanchéité parfaite des coffrages.

La mise en place des BFUP dans les coffrages et les moules nécessite une anticipation et une maitrise de l'orientation des fibres. Les fibres ayant tendance à s'orienter préférentiellement dans le sens d'écoulement du béton frais, il est généralement nécessaire d'éviter le cheminement du matériau lors de sa mise en œuvre et les fronts de bétonnage.

Il convient de privilégier des coffrages avec des arêtes arrondies qui facilitent l'écoulement du matériau et évite toute discontinuité d'écoulement et la rencontre de fronts de coulage sans interpénétration.

Comme pour tous les bétons, des précautions particulières doivent être prises pour l'utilisation des BFUP à des températures basses ou à l'inverse élevées. La cure doit être systématique et particulièrement soignée compte tenu de la très faible teneur en eau du béton, afin d'éviter la dessiccation.

La mise en œuvre nécessite la validation des procédures de bétonnage par des essais préalables de convenance, une maitrise de la rhéologie du béton frais en fonction des conditions climatiques, ainsi qu'une maitrise des tolérances géométriques des coffrages (le respect de ces tolérances est d'autant plus indispensable que les éléments sont de très faible épaisseur).

3.5.8 - Durabilité des BFUP

Du fait de leur microstructure extrêmement dense, de leur porosité capillaire très faible et de leur grande compacité, les BFUP présentent des caractéristiques de durabilité exceptionnelles, quelles que soient les conditions environnementales, face aux agressions et attaques suivantes : cycles gel-dégel, sels de déverglaçage, eau de mer, sulfates, carbonatation, lixiviation, pénétration d'ions agressifs et des acides faibles, abrasion, ultra-violets, chocs, températures élevées (sous réserve de la prise en compte du risque d'écaillage).

La matrice cimentaire des BFUP constitue un milieu quasi imperméable, en particulier, à la pénétration des divers agents agressifs.

Propriétés	***Valeurs***
Porosité	2 % à 5 %
Perméabilité à l'azote	1 à 5.10^{-20} m²
Gel-dégel : – module résiduel après 300 cycles – perte de masse après 300 cycles	 100 % < 10 g/m³
Abrasion (coefficient CNR)	1,3
Carbonation : pénétration sur 15 mm	Plusieurs centaines d'années
Perméabilité à l'oxygène	$< 10^{-9}$ m²
Coefficient de diffusion des ions chlorure	210^{-14} m²/s

Nota

Ces valeurs sont données à titre indicatif, elles dépendent beaucoup du type de BFUP, de sa formulation et de son process de fabrication. Certaines valeurs sont extraites du guide AFGC (cf. 3.5.11), pour la présentation des modes opératoires des essais, il convient de s'y reporter.

3.5.9 - Domaines d'applications potentiels des BFUP

Les nombreuses qualités des BFUP, permettent d'envisager une multitude d'applications aussi bien en structure de génie civil (poutres précontraintes par pré ou post-tension, dalles, passerelles piétonnes, ouvrages offshore, couvertures de grande portée, silos, réservoirs, cuves de rétention, canalisations, conteneurs, murs de soutènement, structures triangulées, voussoirs de tunnels…) qu'en bâtiment (poutres, poteaux élancés, planchers de grande portée…) ainsi que pour la création de pièces esthétiques. Elles offrent des applications innovantes, en particulier pour des structures très minces, perforées ou ajourées jusque-là inaccessibles au matériau béton et réservées à d'autres matériaux.



Les BPUP sont aussi utilisés pour la réparation ou la réhabilitation d'ouvrages (renforcement parasismique de piles de ponts, protection d'ouvrages soumis à l'érosion d'écoulement torrentiel, renforcement de poteaux, renforcement de tablier d'ouvrages d'art à poutres, renforcement structural de faible épaisseur…).

En règle générale les BFUP à base de fibres métalliques sont destinées à des applications structurelles, ceux à base de fibres organiques à des applications architectoniques.

Les BFUP sont utilisés aussi bien par l'industrie du béton pour constituer des produits préfabriqués (résilles, coques, panneaux acoustiques, panneaux de couverture, panneaux de façade, parements de faible épaisseur, grilles décoratives, éléments architecturaux, corniches, escaliers, lames pare-soleil, résilles, mobiliers urbains, sculptures…) que directement sur chantier pour diverses applications.

Les multiples performances des BFUP permettent d'élargir les domaines d'utilisation des bétons en particulier pour la réalisation de structures ou d'éléments de structures :
– soumis à de très fortes agressions chimiques ou mécaniques ou à des chocs importants ;
– situés en site maritime (structures off shore…) ;
– nécessitant des gains de poids ;
– dont la conception à base de béton traditionnel nécessiterait des ferraillages très denses ou des bétonnages complexes.

Les références d'ouvrages réalisés ces dernières années ou en cours de réalisation en BFUP en France sont nombreuses et variées :
– poutrelles de l'aéroréfrigérant de Cattenom ;
– pont de Bourg les Valence (Drome) ;
– pont de Saint Pierre la Cour (Mayenne)[1] ;
– pont de la Chabotte (autoroute A51, Isère)[2] ;
– passerelle des anges (Herault)[3] ;
– couverture de la gare de péage du Viaduc de Millau (Aveyron)[4] ;
– pont canal sur la LGV Est ;
– pont Pinel à Rouen ;
– centre d'autobus de la RATP à Thiais ;
– immeuble des grands moulins de Paris ;
– fondation Louis VUITTON à Paris ;
– toiture de la maison Navarra ;
– cinéma les enfants du paradis à Chartres ;
– coques de couverture des bassins de la station d'épuration seine aval à Achères ;
– couverture du stade Jean Bouin à Paris[5] ;
– musée National des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille : MUCEM (Bouches-du-Rhones)[6].

Les BPUP malgré un coût matière largement supérieur à celui des bétons traditionnels permettent de réaliser des structures économiquement et environnementalement compétitives grâce :
– à une réduction des volumes de matériaux mis en œuvre et donc des ressources naturelles utilisées (matières premières et énergie) ;

1. L'ouvrage est un pont routier constitué de poutres précontraintes par pré-tention en BFUP connectées à un hourdis en béton traditionnel coulé sur des prédalles en BFUP.
2. Le tablier de la Chabotte n'a pas été recouvert d'étanchéité ni de couche de roulement. La rugosité du tablier a été adaptée pour assurer l'adhérence des véhicules circulant sur l'ouvrage.
3. La passerelle conçue par l'architecte Rudy RICCIOTTI et l'ingénieur Romain RICCIOTTI est un ouvrage isostatique de 67,5 m de portée pour une hauteur de 1,80 m (élancement 1/38). Elle est constituée de voussoirs préfabriqués précontraints par post-tension.
4. L'ouvrage présente une géométrie complexe (forme gauche à génératrices hélicoïdales). Il mesure 98 m de long et 28 m de large. Il est constitué de 53 voussoirs préfabriqués à joints conjugués collés et assemblés par des câbles de précontrainte.
5. La couverture du stade Jean Bouin est une coque tridimensionnelle constituée d'éléments de dalles nervurées triangulaires de grandes dimensions en BFUP, associées à des inclusions en verre.
6. Au MUCEM, le BFUP est utilisé pour l'ensemble des structures porteuses périphériques constituées de poteaux arborescents, pour la réalisation des résilles habillant les façades et les toitures ainsi que pour les passerelles d'accès.





– une rapidité de réalisation de structures plus légères ;
– la pérennité du matériau gage d'une réduction très importante des frais de maintenance et d'entretien sur des durées d'utilisation des structures bien plus longues.

Les BFUP ont aussi été utilisés aussi bien en France qu'à l'étranger pour la réparation, la rénovation, la réhabilitation ou la protection d'ouvrages divers dont en particulier : le viaduc de Valabres, le musée de Toulouse Lautrec, l'ouvrage hydraulique de Saint Julien, le viaduc de l'Huisne au Mans, le pont d'Illzach…

À l'étranger, les BFUP ont permis la réalisation de nombreux ouvrages tels que les passerelles de Sherbrooke, Séoul, Sakata Mirai, Papatoetoe, Glemmore, l'extension de l'aéroport d'Haneda, la couverture de la gare de Shawnesy…

3.5.10 - Valorisation des performances des BFUP

Valorisation des résistances mécaniques

Le comportement mécanique du matériau permet de concevoir des ouvrages particulièrement élancés et légers, notamment avec des concepts innovants tels que des structures nervurées en treillis ou ajourées. Il permet de réduire les volumes de béton à mettre en œuvre, d'affiner les structures et donc de réduire le poids des ouvrages et leur impact sur les fondations.

Pour les bâtiments de grande hauteur, par exemple, la réduction de section des poutres permet de construire à coûts et à hauteur égaux des étages supplémentaires. De même, il devient possible avec des portées plus grandes, de réaliser des plateaux libres et d'accroître la surface d'habitation ou de travail.

Les performances mécaniques à court terme contribuent à optimiser les procédés de construction. L'utilisation de la précontrainte valorise les très hautes résistances en compression, en traction ou en flexion du matériau. L'absence d'armatures passives permet de réduire les délais de construction et les sections ou les épaisseurs des pièces.

Liberté de création et de forme

Les résistances élevées du matériau et l'absence d'armature associées à une haute précision du moulage facilitent la réalisation de formes variées pour la construction de structures légères et élancées, et l'élaboration de structures complexes (coques, voiles minces, résilles…).

Les performances mécaniques des BFUP autorisent une grande liberté de création de formes et de volumes.

Valorisation des qualités esthétiques des BFUP

La gamme des BFUP, au besoin complétée par des pigments, permet d'obtenir des textures très variées et des parements lisses satinés, mats, brillants, homogènes et très réguliers présentant d'excellentes qualités esthétiques.

Leur capacité à être moulé et la finesse des grains permettent de reproduire fidèlement les détails très précis de la microtexture de la peau du coffrage ou du moule.

Valorisation de la durabilité des BFUP

Les BFUP sont particulièrement adaptés aux environnements sévères tels que de fortes variations de température ou d'hygrométrie, des agressions chimiques par des ions chlorure ou des acides, des cycles de gél-dégel…

Les gains sur la compacité du béton autorisent la réduction de l'enrobage des armatures éventuelles (armatures passives ou actives).

Les BFUP permettent d'envisager la réalisation d'ouvrages offrant de grandes durées de service pratiquement sans entretien, ni réparation.

3.5.11 - Document de référence



Le document de référence pour les BFUP a été édité en janvier 2002 par l'Association Française de Génie Civil (AFGC) dans sa collection de documents scientifiques et techniques : « Bétons Fibrés à Ultra-Hautes Performances : Recommandations provisoires ».

L'amélioration des connaissances, les retours d'expérience sur les ouvrages réalisés au cours de la dernière décennie, les recherches récentes sur les ouvrages en BFUP ont permis de faire évoluer ces recommandations et de les mettre à jour en cohérence avec les nouvelles normes européennes de dimensionnement des structures (les Eurocodes). Ces nouvelles recommandations (édition 2012) comportent 4 chapitres.



Le chapitre 1 « comportement et caractéristiques mécaniques des BFUP » précise les caractéristiques mécaniques des BFUP (résistance en compression,résistance en traction, module d'élasticité, coefficient de Poisson…) et décrit les méthodes d'essais pour les déterminer et les analyses pour les interpréter. Il détaille aussi les épreuves d'études, de convenance et de contrôle nécessaires lors de la réalisation des ouvrages. L'épreuve de convenance consiste à réaliser un élément témoin à l'échelle 1 permettant d'optimiser les méthodes de bétonnage et de prendre en compte l'incidence de l'orientation privilégiée des fibres par les parois du coffrage lors du coulage.

Le chapitre 2 « Méthode de dimensionnement des structures » a été adapté pour tenir compte des évolutions et des notations de l'Eurocode 2. Il intègre les derniers résultats de recherche concernant par exemple le dimensionnement des ouvrages vis-à-vis du cisaillement.

Le chapitre 3 « Durabilité des BFUP » décrit les principales caractéristiques des BFUP en terme de durabilité. Il présente aussi les derniers résultats d'essais en particulier en matière de comportement vis-à-vis des élévations de températures et des cycles de gel/dégel.

Le chapitre 4 « Développement Durable » synthétise les données environnementales des BFUP et décrit les nouvelles possibilités offertes par ces matériaux en matière de Développement Durable et de recyclage. Les BFUP en optimisant les ressources en matériaux permettent de minimiser l'empreinte environnementale des structures. La durabilité du matériau face aux diverses agressions permet la conception de structures véritablement pérennes. Des études ont démontré la recyclabilité des BFUP et la valorisation potentielle de leurs constituants dans la fabrication de nouveaux bétons.

> ***Nota***
> *Ce document est disponible sur commande à l'AFGC.*

3.5.12 - Perspectives de recherches et développement

Les BFUP fruit d'un ensemble d'avancées scientifiques font encore l'objet de nombreuses recherches. Ces recherches visent à optimiser les performances du matériau, à mieux appréhender son comportement et ses propriétés, à mieux comprendre les effets combinés des fibres et des armatures passives ou de précontrainte sur les caractéristiques mécaniques et la ductilité, à maîtriser les déformations au jeune âge (retrait endogène), à modéliser les écoulements du matériau frais dans les coffrages et les moules et l'orientation privilégiée des fibres.

Les recherches se focalisent aussi sur la mise au point de nouvelles applications et de nouvelles solutions structurelles optimisées.

3.5.13 - Conclusions

Les BFUP compte tenu de leurs multiples performances s'adaptent aux diverses contraintes et exigences des ouvrages. Ils ouvrent de grandes perspectives d'applications pour les structures nécessitant résistances importantes, durabilité et esthétisme. Ils répondent aux évolutions majeures de la construction en permettant d'optimiser les dimensionnements (augmentation des portées, réduction des quantités de matériaux utilisés), de réduire la durée des chantiers et les coûts globaux des ouvrages et l'impact sur l'environnement,d'améliorer l'esthétique des parements et la pérennité des structures et d'offrir une liberté architecturale.

Les différents BFUP disponibles ont des comportements spécifiques, il est donc nécessaire de les caractériser pour chaque application. Il convient en particulier d'appréhender l'interaction de la géométrie et de l'épaisseur des parties d'ouvrage avec les conditions de mise en œuvre afin d'optimiser la répartition homogène des fibres.

Ne nécessitant en général ni vibration, ni armatures passives, les BFUP permettent une diminution de la pénibilité sur les chantiers.

Leurs performances exceptionnelles offrent la possibilité de nouveaux domaines d'applications et de nouvelles structures de bâtiment ou de génie civil sous réserve que les concepteurs s'affranchissent des contraintes et des réflexes habituels de calcul des ouvrages en béton. Le concepteur doit avoir un regard innovant sur la conception et la réalisation de la structure.

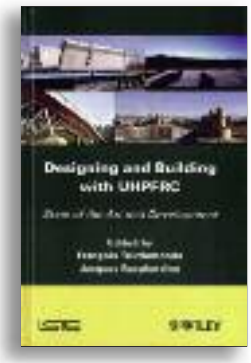
Les BFUP étendent les possibilités d'emploi des bétons en optimisant les structures en particulier en terme de Développement Durable. L'intérêt économique potentiel en terme d'investissement est consolidé par les gains sur la maintenance et l'entretien au cours de la durée d'utilisation de l'ouvrage. Les performances mécaniques des BFUP associées à une haute précision du moulage permettent la réalisation de structures fines et complexes.

Ils réunissent tous les qualificatifs en termes mécaniques et esthétiques : résistance, durabilité, compacité extrême, liberté des formes et des textures. Ils permettent d'inventer de nouvelles formes plus légères qui n'ont de limite que la créativité des architectes.

Ouvrage de référence :

Designing and Building with UHPFRC
State of the Art and Development

Édited by
François Toutlemonde
et Jacques Resplendino
WILEY



Crédit photographique
H. Abadie [37-41-55], R. Araud [44], L. Boegly [42], R. Bouchu [82-83-105], BPE, Cerib, H. Chapon, CLC, P. Donnaes [118], Grace-Pieri, R. Holak, Holcim, M. Ivry, Y. Kerveno, Lafarge, J.-M. Landecy [46], G. Maucuit-Lecomte, M. Moch, J.-M. Monthiers [77-116], D. Morog, Rector, P. Ruault [133], E. Saillet [43], Vicat, A. Vavel [69], P. Vonken, VPI, O. Wogensky [37], P. Zanek [49], tous droits réservés.

Illustration de la couverture
David Lozach

Mise en page et réalisation
Amprincipe Paris
R.C.S. Paris B 389 103 805

Impression
Imprimerie Chirat

Réédition janvier 2013